

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Modelação a partir de dados laser para
reconstituição arquitetural:
Observatório Astronómico da Escola Politécnica**

Pedro Miguel Mónica Lopes

Trabalho de Projeto
Mestrado em Engenharia Geográfica

2013

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Modelação a partir de dados laser para
reconstituição arquitetural:
Observatório Astronómico da Escola Politécnica**

Pedro Miguel Mónica Lopes

Trabalho de Projeto
Mestrado em Engenharia Geográfica

Orientadora: Prof. Dra. Paula Maria F. S. Redweik

2013

Resumo

Situado no jardim botânico da Universidade de Lisboa, o Observatório Astronómico da Escola Politécnica é o único observatório astronómico de ensino em Portugal. O observatório possui uma grande importância histórica, tendo sido nele criado o curso de Engenharia Geográfica que formou grande parte dos engenheiros geógrafos nacionais. A fundação do observatório decorreu em 1875, tendo sido reconstruído em 1898 com uma estrutura mais sustentável. O observatório funcionou como instituição de ensino e investigação até 2002, ano em que foi desativado devido a danos estruturais. Atualmente, o edifício encontra-se encerrado e coberto por painéis de proteção, aguardando a angariação de verbas para a sua recuperação.

O edifício do Observatório Astronómico possui uma planta irregular com formas arquitetónicas ímpares, possuindo alguns pormenores decorativos de grande relevo histórico. O seu interior destaca-se pela sala da Meridiana outrora utilizada para observações através de um círculo meridiano colocado no centro da sala.

De modo a criar-se um modelo tridimensional do edifício foi feito um levantamento LiDAR do exterior do observatório, bem como do interior de uma das principais salas do edifício numa altura em que observatório estava acessível. Os dados originários do levantamento foram processados e foi modelada toda a superfície exterior do edifício, assim como a sala da Meridiana e seus constituintes. Tirando partido da densidade de pontos do sistema LiDAR foi realizada uma modelação detalhada de todas as superfícies do observatório.

Através de técnicas fotogramétricas foram ainda modelados dois instrumentos outrora colocados e utilizados no observatório. A partir de fotografias e utilizando a tecnologia de estrutura a partir do movimento (SFM), foi gerada uma nuvem de pontos relativamente a estes instrumentos.

O modelo 3D de todo o observatório gerado correspondeu às expectativas, retratando pormenorizadamente o edifício através da modelação de todos os pormenores visíveis na nuvem de dados. A este modelo foram aplicadas texturas fotográficas de modo a dar-lhe uma aparência ainda mais real.

Palavras-chave:

Modelação 3D; Reconstituição de edifícios; Structure from Motion, Laser-scanning.

Abstract

Settled at the botanical garden of Lisbon University, the Polytechnic's Observatory emerges as the only instructional astronomic observatory in Portugal. Founded in 1875 and being the genesis place of the Geographic Engineering apprenticeship in national territory, the observatory holds great historical relevance, owning credit for the graduation of most geographer engineers in the country. Reconstructed in 1898, aiming for structural sustainability reinforcement, the observatory worked as a teaching and investigation institution until 2002, when its facilities were disabled due to structural damages. The building is currently sealed and its recovery pending on financial issues.

This irregularly designed historical building possesses unique architectural forms, specially its ornamental details. Meanwhile in its interior, the Meridian Room, once used for observations through a Meridian Circle place at its center, is the highlight.

In order to generate a tridimensional model of the building, it was engaged a LiDAR gathering of the observatory's exterior, as well as of the Meridian Room. The collected data was processed, enabling an accurate modeling of both the external surface of the building and the Meridian Room, including its components, profiting on the highly detailed data provided as a LiDAR output.

Through photogrammetric techniques, there were also modeled two scientific instruments once located at the observatory. In this case, the generation of the dot data cloud used photographs as the input, via Structure from Motion (SFM).

The 3D-Model of the observatory matched the expectations, portraying the building in high detail, through the modeling of each feature emerging from the dot data cloud. To the output of the model were applied photographic textures, in order to obtain an even more realistic final appearance.

Keywords:

3D-Modeling; Building Reconstitution; Structure from Motion (SFM); Laser-scanning.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às pessoas sem as quais a conclusão deste projeto não teria sido possível.

À minha orientadora, Sra. Professora Doutora Paula Redweik, pelo seu entusiasmo em relação a este projeto e pela paciência para todas as minhas dúvidas.

À Universidade de Extremadura, sediada em Espanha, em especial ao doutorando Fernando Berenguer pela cedência da licença de *software* e pela prontidão na resolução de problemas relacionados com a mesma, sem o qual a conclusão deste projeto não seria possível.

À minha mãe, por todo o seu apoio e dedicação na minha formação académica e pessoal ao longo de toda a minha vida.

À minha irmã Cláudia e ao meu cunhado Francisco, por todo o apoio moral e logístico oferecido no decorrer deste projeto.

Índice

Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas	xi
1. Introdução.....	12
1.1 Enquadramento	12
1.2 Objetivo	14
1.3 Organização do trabalho.....	15
2. Fundamentação teórica.....	16
2.1 Princípio básico do LiDAR	16
2.2 Princípio básico da reconstrução 3D usando estrutura a partir do movimento (SFM) 17	
2.3 Princípios utilizados pelos <i>software</i>	18
2.3.1 Trimble Realworks.....	18
2.3.2 VisualSFM.....	19
3. Os Dados	21
3.1 Descrição do objeto de estudo	21
3.2 Descrição dos dados.....	21
4. Metodologia.....	24
4.1 Modelação do exterior a partir de pontos LiDAR.....	24
4.1.1 Paredes exteriores e Rodapés	24
4.1.2 Painéis de ligação.....	27
4.1.3 Janelas, Portas e Degraus.....	29
4.1.4 Bordo superior.....	32
4.1.5 Chão e Terraço	34
4.1.6 Cúpulas.....	35
4.1.7 Gradeamento	38
4.2 Modelação do interior a partir de pontos LiDAR	39
4.2.1 Sala da Meridiana.....	39

4.2.2	Sala central	41
4.2.3	Sala de aula	42
4.3	Aplicação de texturas	47
4.3.1	Superfície exterior	47
4.3.2	Superfície interior	51
4.4	Modelação de objetos a partir de fotogrametria	55
4.4.1	Teodolito	55
4.4.2	Círculo Meridiano	58
5.	Crítica aos <i>software</i> utilizados	60
5.1	Trimble Realworks	60
5.2	VisualSFM	60
6.	Análise de Resultados	62
7.	Conclusão	65
8.	Referências	66
9.	Anexos	67

Índice de Figuras

Figura 1 – Observatório Astronómico da Escola Politécnica [Ramalho, 1882]	12
Figura 2 – Observatório Astronómico da Escola Politécnica reconstruído em 1898 [Museu Natural de História Natural e da Ciência, 2010]	14
Figura 3 – Aparência do exterior do Observatório Astronómico da Escola Politécnica atualmente (2013)	14
Figura 4 – Representação da superfície tórica (à esq.) e da superfície cilíndrica dupla (à dir.)	18
Figura 5 – Observatório Astronómico da Escola Politécnica [Paulu, 2011]	21
Figura 6 – Sensor utilizado no levantamento laser do observatório	22
Figura 7 – Nuvem de dados colorida	22
Figura 8 – Nuvem de dados do interior da sala da Meridiana	23
Figura 9 – Representação de uma parede plana e do objeto modelado	24
Figura 10 – Pontos representativos das paredes exteriores do observatório	25
Figura 11 – Cilindros auxiliares utilizados na modelação de paredes curvas	25
Figura 12 – Paredes curvas modeladas	26
Figura 13 – Lacunas do rodapé na nuvem de pontos	27
Figura 14 – Representação do “esqueleto” base do modelo 3D	27
Figura 15 – Conexões entre fachadas (destacadas a vermelho)	28
Figura 16 – Representação das profundidades/saliências dos objetos circundantes às junções	28
Figura 17 – Exemplo de janela plana (à esq.) e janela curva (à dir.)	29
Figura 18 – Janela parcialmente curva	30
Figura 19 – Pormenores das portas das entradas principais	31
Figura 20 – Representação das superfícies geométricas constituintes dos degraus	31
Figura 21 – Portas laterais do observatório	32
Figura 22 – Representação da estrutura vertical do observatório	32
Figura 23 – Bordo superior: nuvem de pontos (à esq.) e modelo 3D (à dir.)	33
Figura 24 – Interseção entre cilindros sem superfície tórica (em cima) e com superfície tórica (em baixo)	34
Figura 25 – Terraço do observatório	35
Figura 26 – Painéis de abertura da sala da Meridiana	35
Figura 27 – Cúpula periférica	36
Figura 28 – Cúpula central e seus níveis	36
Figura 29 – Comparação da modelação de uma das estruturas da cúpula central com uma superfície cilíndrica dupla (à esq.) e com várias superfícies cilíndricas duplas com alturas variáveis (à dir.)	37
Figura 30 – Porta de acesso à cúpula central	38
Figura 31 – Representação da exatidão dos constituintes do gradeamento modelado	39
Figura 32 – Gradeamento no terraço do observatório	39
Figura 33 – Suporte do círculo meridiano	40
Figura 34 – Painéis laterais da abertura pertencente à sala da Meridiana	40
Figura 35 – Limites dos desfasamentos em janelas e portas da sala da Meridiana	41
Figura 36 – Sala central	42
Figura 37 – Fotografia da sala de aula do observatório	43

Figura 38 – Estrutura base da modelação da sala de aula	43
Figura 39 - Representação, na foto, das medições utilizadas no dimensionamento do quadro (com destaque no pormenor da janela)	44
Figura 40 – Representação, no modelo, das medições utilizadas no dimensionamento do quadro	44
Figura 41 - Quadro pertencente à sala de aula	45
Figura 42 – Representação panorâmica da sala de aula	46
Figura 43 – Corredores modelados no interior do observatório	46
Figura 44 – Objetos colocados nas janelas de modo a torná-las opacas	47
Figura 45 – Modelo 3D com cores realistas	47
Figura 46 – Representação das várias etapas de conversão de objetos na aplicação de textura: superfícies geométricas (à esq.), <i>meshes</i> (ao centro), <i>meshes</i> com textura (à dir.)	48
Figura 47 – Representação da edição feita nas fotografias	49
Figura 48 – Distribuição de pontos homólogos na referência da estrutura do vão de fachada da janela	50
Figura 49 – Distribuição de pontos homólogos nas portas	50
Figura 50 – Pormenores decorativos da sala da Meridiana	52
Figura 51 – Sujidade do suporte do círculo meridiano	52
Figura 52 – Fotografia do mosaico da sala central do observatório	53
Figura 53 – Textura aplicada no chão da sala central	54
Figura 54 – Modelo 3D da sala de aula	55
Figura 55 – Fotografia do teodolito modelado	56
Figura 56 – Nuvem de dados do teodolito	57
Figura 57 – Teodolito parcialmente modelado	57
Figura 58 – Fotografia do círculo meridiano	58
Figura 59 – Nuvem de pontos gerada depois do processamento das fotografias do círculo meridiano	59
Figura 60 - Modelo 3D do círculo meridiano sem textura (à esq.) e com textura (à dir.)	59
Figura 61 – Sala da Meridiana	62
Figura 62 – Círculo meridiano com textura fotográfica	64
Figura 63 – Fotografia utilizada na modelação das portas de acesso à cúpula central 1	67
Figura 64 - Fotografia utilizada na modelação das portas de acesso à cúpula central 2	67
Figura 65 - Modelo 3D com enfoque na zona superior do observatório	68
Figura 66 - Modelo 3D com enfoque na fachada frontal do observatório	68
Figura 67 - Porta de acesso à sala da Meridiana	69
Figura 68 - Sala de aula (sem textura)	69
Figura 69 - Porta de acesso à cúpula central	70
Figura 70 - Sala da Meridiana (perspetiva exterior)	70

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Superfícies geométricas utilizadas.....	19
Tabela 2 – Número de pontos homólogos utilizados em cada tipo de objeto da superfície exterior.....	51
Tabela 3 - Número de pontos homólogos utilizados em cada tipo de objeto no interior do observatório.....	55
Tabela 4 - Desvio padrão das superfícies modeladas	63

Lista de Abreviaturas

LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
ALS	<i>Airborne Laser Scanning</i>
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanning</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
SFM	<i>Structure from Motion</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
GPU	<i>Graphic Processing Unit</i>
SIFT	<i>Scale Invariant Feature Transform</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
DANT	Dispositivo Aéreo Não Tripulado

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Quando a Escola Politécnica foi criada em 1837 com o intuito de formar alunos para os cursos das escolas militares foi decretado que o antigo Observatório Real da Marinha seria anexado a esta instituição de ensino. Este observatório, construído em 1824, tinha ao seu dispor vários aparelhos, poucos, visto que a maior parte deles foi retirada do observatório a fim de seguirem com a família real para o Brasil. Os períodos conturbados que se seguiram às invasões francesas, com o constante ambiente de guerra civil não foram propícios a investimentos no observatório, até que a 22 de Abril de 1843 um incêndio destruiu o edifício da Escola Politécnica, obrigando à mudança do ensino da Astronomia para o observatório da Marinha. Mas, não estando este observatório vocacionado para o ensino da Astronomia e Geodesia foram tomadas diligências por alguns professores da Escola Politécnica, com o apoio do ministro da Marinha, para a construção de um conjunto de instalações adequado à realização de trabalhos no âmbito da Astronomia e Geodesia e que pudesse ainda servir de estabelecimento de ensino. Em 1875, todos estes esforços resultaram na fundação do Observatório Astronómico da Escola Politécnica, tendo o observatório sido construído em dois planos diferentes: o primeiro plano era o do jardim superior onde o edifício comportava rés-do-chão, três cúpulas de observação e um terraço onde existiam duas cúpulas para instrumentos portáteis; o segundo plano, inferior a esse terraço, continha os edifícios das oficinas, o albergue do contínuo e a biblioteca.



Figura 1 – Observatório Astronómico da Escola Politécnica [Ramalho, 1882]

Todo o observatório havia sido equipado com instrumentos de observação, o que possibilitava o estudo regular dos corpos do sistema solar através da espectroscopia de astros e a aquisição de fotografias astronómicas. Para a cúpula central do edifício, foi adquirido um equatorial fotográfico de 11 polegadas, que era, até à data, um dos melhores instrumentos fotográficos

do Mundo. Porém, a sua colocação sobre aterros de recente data junto ao muro de suporte do jardim superior, conjuntamente com os abalos resultantes da abertura do túnel do Rossio que passava a cerca de 55 metros do eixo do edifício, originaram danos graduais na estrutura do observatório que, em 1893, já indiciavam a necessidade de obras de consolidação de grande dimensão. Os estudos para a consolidação do edifício foram realizados, mas as obras de recuperação nunca foram iniciadas uma vez que, em Janeiro de 1897 começou a demolição do edifício do plano superior, seguindo-se a sua reconstrução com o recuo do eixo longitudinal de cerca de 18 metros do muro que continha o jardim superior.

A reconstrução deste novo edifício foi concluída em 1898, com uma estrutura singular. Todavia, apesar das novas instalações, os instrumentos utilizados eram antigos e inadequados ao exercício de funções do observatório, até que, em 1905, tomou posse como diretor do Observatório o professor Pedro José da Cunha tendo sido este o grande responsável para o renascimento das atividades do observatório, iniciando a remodelação total dos métodos de ensino e da aquisição de novos instrumentos, principalmente para observação do Sol e para o estudo da espetrografia. O ensino e a investigação foram assegurados através da contínua remodelação de instrumentos, até que em 1920 a seção de matemática da Escola Politécnica propõe a criação de um curso de Engenheiro Geógrafo, proposta esta que veio a ser aprovada algum tempo depois.

Tudo parecia antever um futuro promissor para o observatório até que, em 1933, o observatório é extinto por ordem do governo, invocando razões económicas. Em sua substituição cria-se o gabinete de Astronomia, herdando as instalações, os equipamentos e os professores mas desaparecem as verbas concedidas. Apesar das dificuldades, com o auxílio da Fundação Calouste Gulbenkian, é criada uma biblioteca integrada de Mecânica Racional e Física Matemática que, paralelamente à biblioteca existente, muito enriqueceu a pesquisa bibliográfica do pessoal do Gabinete. Ao longo do tempo foram efetuadas várias obras de manutenção, a muito custo, devido à falta de verbas e apesar de tudo, foi possível a aquisição de alguns instrumentos necessários ao correto funcionamento do observatório. Mas a degradação do edifício e dos equipamentos acelerava-se. A oxidação das estruturas de abertura das cúpulas tornou-as praticamente inoperáveis, até que em 1971 o Gabinete de Astronomia é extinto integrando-se as instalações do observatório e o curso de Engenharia Geográfica na Matemática Aplicada. Em 1982 foram reformulados os cursos da Faculdade de Ciências, sendo então criado o Departamento de Matemática Aplicada, que herdou as instalações e equipamentos do observatório assegurando a continuação do ensino da licenciatura em Engenharia Geográfica [Gil e Canelhas, 1987].



Figura 2 – Observatório Astronómico da Escola Politécnica reconstruído em 1898 [Museu Natural de História Natural e da Ciência, 2010]

O curso de Engenharia Geográfica foi lecionado no observatório até ao ano de 2002, altura em que o mesmo foi desativado e deixou de ser utilizado como estabelecimento de ensino. Atualmente tutelado pelo Museu Nacional de História Natural e da Ciência este edifício, situado no Jardim Botânico de Lisboa, encontra-se com graves danos estruturais, sob risco de colapso, e mantém-se encerrado tendo sido colocados vários painéis de proteção para a chuva cobrindo todo o edifício (Figura 3). O projeto de restauro do observatório já existe, mas ainda não foi materializado devido à falta de verbas, deixando assim todos momentos históricos guardados por este edifício a desvanecerem-se.



Figura 3 – Aparência do exterior do Observatório Astronómico da Escola Politécnica atualmente (2013)

1.2 Objetivo

O objetivo deste projeto centra-se na reconstituição detalhada do exterior e interior do Observatório Astronómico da Escola Politécnica, pretendendo-se criar um modelo tridimensional com grande semelhança ao edifício tentando reproduzir todas as formas e

pormenores. Este modelo terá não só de ser geometricamente exato, como deverá também ser visualmente apelativo, permitindo a navegação tridimensional virtual no exterior e no interior do mesmo.

Este projeto enquadra-se num conjunto de esforços realizados pelo Museu Nacional de História Natural e da Ciência para angariação de fundos, na tentativa de que a divulgação deste e de outros modelos do observatório tenham um efeito catalisador na aquisição de verbas para recuperação do Observatório Astronómico da Escola Politécnica de modo a que possa ser aberto ao público como museu.

1.3 Organização do trabalho

Este documento pretende descrever todo o trabalho desenvolvido delineando as principais fases do projeto realizado.

Sendo este um projeto, aquando da elaboração deste documento foi dado maior ênfase à parte prática, deixando-se a fundamentação teórica em segundo plano.

No capítulo 1, é feita uma descrição geral dos motivos que levaram à realização deste projeto assim como os seus objetivos para enquadramento do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada alguma fundamentação teórica explicando os conceitos necessários para a perceção deste trabalho e é feita uma apresentação dos princípios fundamentais dos *software* utilizados no decorrer deste projeto.

No capítulo 3, é feita uma breve descrição dos dados iniciais deste projeto bem como das suas formas de aquisição.

O capítulo 4 incide detalhadamente na metodologia utilizada na realização do projeto, apresentando uma descrição dos métodos aplicados a todos os constituintes do projeto e na sua concatenação para o produto final.

No capítulo 5, é feita uma breve crítica aos *software* utilizados com base na sua utilização no âmbito deste projeto.

No capítulo 6, é feita uma análise aos resultados obtidos e são apresentadas algumas técnicas utilizadas para avaliar a qualidade do produto final.

O capítulo 7 incide sobre as conclusões deste projeto, deixando ainda algumas ideias que visam o desenvolvimento e melhoramento deste trabalho.

No decorrer da elaboração deste documento, face à necessidade de aglutinar uma forma geométrica e vários sólidos geométricos, utiliza-se o termo “*superfície geométrica*” para designar o conjunto das superfícies de todos os sólidos utilizados na modelação, agrupando-os ainda com a forma geométrica *plano*.

2. Fundamentação teórica

2.1 Princípio básico do LiDAR

O LiDAR (*Ligth Detection And Ranging*) ou simplesmente *laser-scanning* é um método que se baseia na medição de distâncias a partir da emissão e receção de um feixe laser. Esta tecnologia permite a aquisição de grandes volumes de dados com grande resolução, a uma maior velocidade comparativamente a outras tecnologias [Falcão, 2012]. A aquisição de dados é realizada através do varrimento laser de superfícies gerando, após o processamento, uma nuvem de pontos tridimensional a partir da qual é possível extrair informação planimétrica e altimétrica. O sistema LiDAR divide-se em dois tipos de plataformas: *Airborne Laser Scanning* (ALS) e *Terrestrial Laser Scanning* (TLS). Atualmente, o *laser-scanning* terrestre é uma das técnicas mais utilizadas na reconstrução 3D de edifícios históricos pelo que, neste projeto, será dada mais importância a esta plataforma.

O TLS conjuga a capacidade de operar na ausência de luz e sem necessidade de alvos refletores à rapidez de aquisição de densas quantidades de dados tridimensionais. O TLS encontra-se ainda dividido em fixo e móvel. No caso de este ser fixo, a aquisição de pontos é feita a partir de uma posição estática sobre a superfície do terreno. A metodologia aplicada nesta situação é similar à utilizada nas estações totais refletoras, apesar de existirem algumas diferenças em relação ao comprimento de onda utilizado pelo laser, à quantidade e rapidez de pontos obtidos, no processamento dos dados e ainda nas fontes de erros associadas. Como já foi referido anteriormente, o produto final obtido após o processamento de dados é uma nuvem de pontos tridimensional, orientada segundo o mesmo sistema de coordenadas, escolhido aquando da georreferenciação dos pontos estação e orientação. A cada ponto presente na nuvem de pontos estão associadas coordenadas X,Y e Z, a intensidade de retorno do laser e os valores RGB, caso exista uma câmara fotográfica acoplada ao *scanner* [California Department of Transportation, 2011]. Deste modo, tal como referido, as principais vantagens na utilização deste método recaem na grande densidade de pontos adquirida e na sua elevada precisão, apesar de a última estar ainda dependente do tipo de medições efetuadas sobre uma determinada superfície, uma vez que medições efetuadas de modo perpendicular em relação à superfície obtêm maior precisão do que as medições efetuadas com um ângulo de incidência maior devido à difração do feixe laser.

No caso do TLS móvel, este requer o uso de uma plataforma móvel, como um veículo terrestre, e encontra-se ainda associado a um sistema GPS/IMU que determina em intervalos de tempo estipulados a posição e atitude do veículo terrestre. A operar junto com este sistema existe ainda um recetor base em terra, a partir do qual se adquirem as correções necessárias para, em pós-processamento, se determinar as coordenadas X,Y e Z de cada ponto.

2.2 Princípio básico da reconstrução 3D usando estrutura a partir do movimento (SFM)

Quando o olho humano recolhe informação de um objeto tridimensional numa fotografia 2D é impossível ter a perceção total de toda a profundidade e da forma do objeto presente na foto. Porém, se em vez de uma única fotografia, for observado um vídeo desse mesmo objeto, o olho humano processa mais informação do objeto através do movimento relativo entre o objeto e a câmara, pois quando a câmara se move relativamente ao objeto esta capta diferentes perspetivas do mesmo, permitindo assim ao olho humano recolher mais informação acerca das formas do objeto através da visualização de várias perspetivas em vez de apenas uma, sendo assim possível ter a perceção tridimensional do objeto. Este fenómeno é denominado SFM (*Structure From Motion*) [Kanade and Morris, 1997].

No âmbito da investigação nas áreas de ciências computacionais e da robótica foram criadas, nos últimos anos, várias aplicações informáticas de SFM tentando reproduzir informaticamente o comportamento humano. O grande objetivo destas aplicações é a recuperação da estrutura 3D de um objeto assim como os movimentos da câmara (rotação e translação) a partir de um conjunto de imagem contendo várias perspetivas do objeto [Shum *et al*, 1999].

O SFM conjuga, habitualmente, duas etapas distintas: a primeira etapa consiste na deteção de características relevantes da cada uma das imagens, detetando pontos de interesse e possíveis pontos constituintes do objeto.

O sucesso destes algoritmos depende da eficácia da correspondência de imagens, já que estes algoritmos se baseiam na claridade e no movimento de translação do modelo devendo existir uma grande sobreposição entre fotografias sequenciais de modo a permitir bons resultados [Shun *et al*, 1999].

A segunda etapa consiste no cálculo dos parâmetros do modelo 3D de modo a permitir a reconstituição do objeto.

Atualmente existem diversas abordagens a esta segunda etapa do SFM. A mais utilizada é a triangulação por feixes perspetivos. Este método é amplamente utilizado na fotogrametria e permite a reconstrução do objeto através da otimização das posições de pontos 3D e dos parâmetros da câmara fotográfica minimizando o erro de reprojeção utilizando, habitualmente, um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados.

O erro de reprojeção corresponde à diferença entre a localização de um ponto 3D de interesse observado e a sua projeção correspondente no plano imagem da câmara [Wu *et al*, 2011] pelo que, tirando partido dos vários feixes com origem no ponto 3D que intersectam vários planos imagem nos pontos imagem respetivos em cada uma das fotos se conseguem obter as coordenadas relativas do objeto.

A principal motivação para o aparecimento contínuo de novos *softwares* de SFM é a tentativa de redução do tempo de processamento durante a execução da reconstrução 3D. Os algoritmos mais recentes tiram partido do paralelismo das duas principais unidades de processamento do computador a CPU (*Central Processing Unit*) e a GPU (*Graphic Processing Unit*) de modo a acelerar a execução deste tipo de algoritmos.

2.3 Princípios utilizados pelos *software*

2.3.1 Trimble Realworks

O *Trimble Realworks* é um *software* direcionado para o manuseamento de dados originários de varrimentos laser, sob a forma de nuvens de pontos, com o intuito de criar modelos tridimensionais. No desenrolar deste projeto foi utilizada a versão 6.5.1 do *Trimble Realworks* utilizando uma licença generosamente cedida pela Universidade de Extremadura sediada em Espanha.

Este *software* destaca-se pelo facto de permitir uma fácil segmentação e seleção de pontos na nuvem de dados, permitindo a modelação de objetos num processo claro, preciso e de fácil edição. No *Trimble Realworks*, a modelação de superfícies pode ser feita utilizando duas técnicas distintas. Uma superfície pode ser criada de raiz, definindo apenas os seus parâmetros, não utilizando quaisquer dados de suporte. A outra técnica pressupõe a utilização de uma seleção de pontos da nuvem para a obtenção de uma superfície. Esta superfície é gerada por ajustamento de uma das superfícies geométricas disponíveis no *software*. A escolha da superfície é feita pelo utilizador sendo esta posicionada, orientada e escalada pelo *software* de modo a minimizar o desvio-padrão das distâncias entre o conjunto de pontos e a superfície modelada.

As superfícies geométricas utilizadas em ambas as técnicas de modelação permitem uma conjugação de formas bastante completa. Para além dos sólidos mais convencionais como: a esfera, o cilindro, o cone e o paralelepípedo, foram utilizados outros dois sólidos geométricos importantes na modelação. O primeiro, o toro, assemelha-se à forma de um donut tendo sido principalmente utilizado nas paredes curvas, enquanto o segundo é designado de superfície cilíndrica dupla cuja forma se assemelha a uma anilha tendo sido utilizado em bordos de objetos de pequena dimensão. Para além de todos estes sólidos, na modelação, é possível utilizar ainda o plano como superfície geométrica, limitando esta forma geométrica de dimensões infinitas. Todas as superfícies geométricas utilizadas são apresentadas na Tabela 1 bem como as suas principais aplicações.

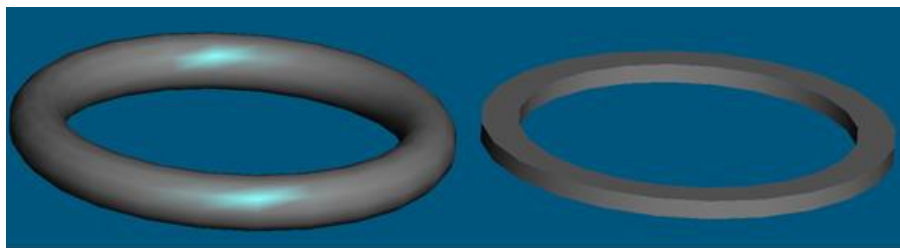


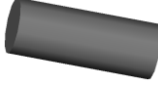






Figura 4 – Representação da superfície tórica (à esq.) e da superfície cilíndrica dupla (à dir.)

Tabela 1 – Superfícies geométricas utilizadas

Tipo de superfície	Principais zonas de utilização	Representação geométrica
Plano	Paredes planas, portas, janelas	
Esfera	Cúpula principal	
Cilindro	Pilares, canos de escoamento de águas, degraus, varanda	
Cone	Telhados	
Paralelepípedo	Paredes, rodapés	
Superfície tórica (donut)	Pormenores da cúpula, bordo do telhado, pequenas interseções	
Superfície cilíndrica dupla (anilha)	Paredes curvas	

Para além das técnicas de modelação, existe a possibilidade de criação de uma malha (*mesh*). Esta pode ser obtida a partir de duas metodologias distintas: a partir de uma seleção de pontos, não tendo esta técnica sido utilizada neste projeto devido à irregularidade das *meshes* criadas; ou a partir da conversão de superfícies regulares em *mesh*, tendo este último método sido bastante útil na execução deste projeto já que, apesar do *software* permitir a aplicação de textura fotográfica, esta operação não é viável sobre as superfícies geométricas regulares, havendo apenas a possibilidade de aplicar textura sobre *mesh*.

2.3.2 VisualSFM

O *VisualSFM* é uma aplicação gráfica de reconstrução 3D que utiliza algoritmos da estrutura a partir do movimento (*SFM - Structure from Motion*) através do processamento de fotografias sequenciais. Esta aplicação informática processa dados de forma eficiente utilizando a CPU (*Central Processing Unit*) e a GPU (*Graphics Processing Unit*) em paralelo, de modo a tornar o processamento mais rápido.

Como a maioria dos *software* de *SFM*, para a reconstrução 3D, o *VisualSFM* necessita apenas de fotografias contendo várias perspetivas de um determinado objeto imóvel.

O *VisualSFM* utiliza duas grandes componentes: o *siftGPU* e o *Multicore Bundle Adjustment*.

O *SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)* é um método de extração de características invariáveis de um conjunto de imagens de modo a proporcionar uma correspondência entre imagens de várias perspetivas de um objeto [Lowe, 2004].

Este método processa um conjunto de imagens e extrai características que não dependem da escala, nem de movimentos de rotação. As características são recolhidas de um grupo inicial de fotografias de referência, sendo depois guardadas numa base de dados. Posteriormente é analisada cada uma das restantes fotografias do objeto, comparando as suas características com as características presentes na base de dados de modo a ordenar, uma a uma, todas as fotografias do objeto numa sequência lógica.

A execução do *SIFT* pode ser uma tarefa bastante morosa, pelo que, de modo a minimizar o tempo de execução, o algoritmo utiliza recursos da unidade gráfica de processamento (GPU) dando origem à designação *siftGPU*.

O *Multicore Bundle Adjustment* consiste num método eficiente de ajustamento por feixes perspetivos utilizando as funcionalidades do CPU (de vários núcleos) e a GPU em paralelo.

O ajustamento (*Bundle Adjustment*) utilizado nesta aplicação consiste num ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados de modo a minimizar o erro de reprojeção nas fotografias dos pontos tridimensionais calculados, obtendo-se assim as coordenadas tridimensionais ajustadas do objeto e ainda os parâmetros da câmara. Este processo pode ser moroso, principalmente quando é necessário processar um grande número de fotografias [Agarwal *et al*, 2010].

De modo a minimizar o tempo de processamento total existem duas condições a seguir: maximizar a utilização do processador (CPU) e otimizar o acesso à memória. Para tal, são utilizadas a CPU e GPU em paralelo permitindo a execução dinâmica de cálculos matriciais, alocando memória na RAM (*Random Access Memory*) apenas quando necessário, reduzindo assim o tempo total de processamento dos dados [Wu *et al*, 2011].

O VisualSFM utiliza ainda uma ferramenta denominada PMVS/CMVS, (*Patch-based Multi-View Stereo/Clustering Views for Multi-View Stereo*) que processa um conjunto de imagens e os parâmetros da câmara obtidos anteriormente e reconstrói por interseção espacial direta uma estrutura 3D do objeto contido nas imagens, produzindo uma nuvem de pontos representativa do objeto.

3. Os Dados

3.1 Descrição do objeto de estudo

Para a elaboração deste trabalho, foram utilizados dados provenientes de um levantamento com *laser-scanner* terrestre do Observatório Astronómico da Escola Politécnica. A estrutura arquitetónica do observatório consiste numa planta irregular, composta por um volume central octogonal rodeado por duas estruturas laterais sendo estas limitadas exteriormente por dois corpos laterais ovalados possuindo, na zona superior do edifício, um terraço com duas coberturas diferenciadas. A fachada principal é orientada para Sudeste, possuindo, no corpo central, uma cúpula esférica com vários pormenores. Toda a estrutura é rasgada regularmente por janelas retilíneas e portas de verga reta. No interior, a sala da Meridiana, de planta ligeiramente curva, foi construída usando madeiras exóticas predominando o mogno da Guiné formando diversas molduras com ornamentação muito rica [Vale *et al*, 2011].



Figura 5 – Observatório Astronómico da Escola Politécnica [Paulu, 2011]

3.2 Descrição dos dados

Os dados deste projeto foram adquiridos através da realização de um levantamento laser a toda a superfície exterior do observatório, realizado em cooperação com docentes da Universidade de Extremadura sediada em Espanha, utilizando um sensor *Leica ScanStation C10* com câmara fotográfica acoplada (Figura 6).



Figura 6 - Sensor utilizado no levantamento laser do observatório

De modo a adquirir dados da superfície exterior do observatório foram feitos quatro posicionamentos na zona circundante ao edifício, permitindo uma cobertura total do edifício a partir do solo (Figura 7).



Figura 7 - Nuvem de dados colorida

Para além da superfície exterior, foi ainda possível realizar dois posicionamentos no interior do observatório permitindo a obtenção de dados numa das salas mais carismáticas do observatório, a sala da Meridiana (Figura 8).

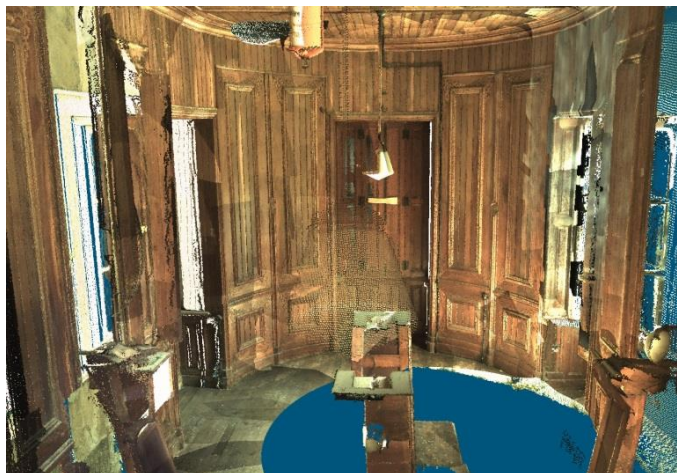


Figura 8 – Nuvem de dados do interior da sala da Meridiana

A partir do levantamento ao Observatório Astronómico da Escola Politécnica foram pré-processadas as 4 nuvens de pontos representativas de toda a superfície exterior do observatório e 2 nuvens de pontos representando o interior da sala da Meridiana. Todas estas nuvens foram concatenadas numa só nuvem de dados tridimensional a partir de 2 alvos comuns a cada par de nuvens. De modo a facilitar a modelação, e como referido anteriormente, foram preservadas todas as características de cada um dos 46.503.048 pontos da nuvem: a sua posição X,Y,Z, a intensidade de retorno laser e os valores RGB, tendo estes últimos uma importância acrescida, visto que a cor de cada ponto permite a perceção dos pormenores da nuvem de dados facilitando assim a modelação de objetos a partir da nuvem.

Para além da cobertura fotográfica feita pelo sensor aquando do levantamento para a obtenção de cor em todos os pontos na nuvem de dados, foram utilizadas ainda 57 fotografias exteriores adquiridas no âmbito de outro projeto fotogramétrico realizado no Observatório Astronómico da Escola Politécnica para a aplicação de texturas no modelo. Durante a execução deste projeto foi feita uma visita ao observatório de modo a obterem-se mais fotografias. O observatório foi aberto expressamente para este propósito, permitindo a recolha de fotografias e dada a impossibilidade de obtenção de mais fotografias do exterior do observatório devido à presença dos andaimes e da cobertura (Figura 3), foram adquiridas fotografias de algumas salas no interior do edifício visando-se especialmente a sala da Meridiana.

No âmbito dessa visita foi feita uma deslocação ao depósito e foram adquiridas ainda fotografias de alguns instrumentos pertencentes ao observatório, que eram utilizados para realizar observações astronómicas. Porém, neste caso, o número de fotografias adquiridas em cada instrumento foi bastante redundante, visto que estas fotografias não se destinavam à aplicação de texturas mas sim à reconstrução 3D dos instrumentos. Entre todos os objetos deu-se maior enfoque ao círculo meridiano, instrumento de observação anteriormente localizado na sala da Meridiana, visto ser o instrumento mais relevante e cujo suporte já se encontrava representado na nuvem de dados LiDAR do observatório. A câmara fotográfica utilizada na aquisição destas fotografias foi uma Sony Cyber-shot DSC-W630, com sensor CCD (*Charged Couple Device*) de 16 megapixels gerando fotografias com 2304 x 1728 pixels.

4. Metodologia

4.1 Modelação do exterior a partir de pontos LiDAR

4.1.1 Paredes exteriores e Rodapés

Grças à densidade da nuvem de pontos, fator requerido neste tipo de projetos, foi possível modelar todas as superfícies com grande exatidão, obtendo-se um modelo 3D, uma representação com uma forte semelhança com o edifício.

Dada a grande complexidade arquitetural do observatório decidiu-se primeiramente, modelar as paredes exteriores do edifício. As paredes foram agrupadas em dois grupos: paredes planas e paredes curvas.

Na modelação de cada objeto apenas são utilizados os pontos da nuvem nele contidos pelo que, antes da modelação de cada superfície, foi realizada uma segmentação manual da nuvem de pontos.

Começou-se pela modelação de paredes planas. Ao longo do exterior do observatório existem quatro fachadas planas possuindo cada uma delas uma janela, pelo que foi realizada uma segmentação manual da nuvem de pontos selecionando apenas dados pertencentes à parede plana excluindo todos os outros constituintes: janelas e outros pormenores das fachadas.

Nestas secções, optou-se por utilizar o plano como superfície geométrica modelada visto ser uma das superfícies mais versáteis em termos de edição, permitindo a criação de aberturas no seu interior (Figura 9).



Figura 9 - Representação de uma parede plana e do objeto modelado

Mas, o observatório possui maioritariamente paredes curvas no seu exterior, pelo que houve a necessidade de encontrar um método preciso que representasse estas superfícies convenientemente.

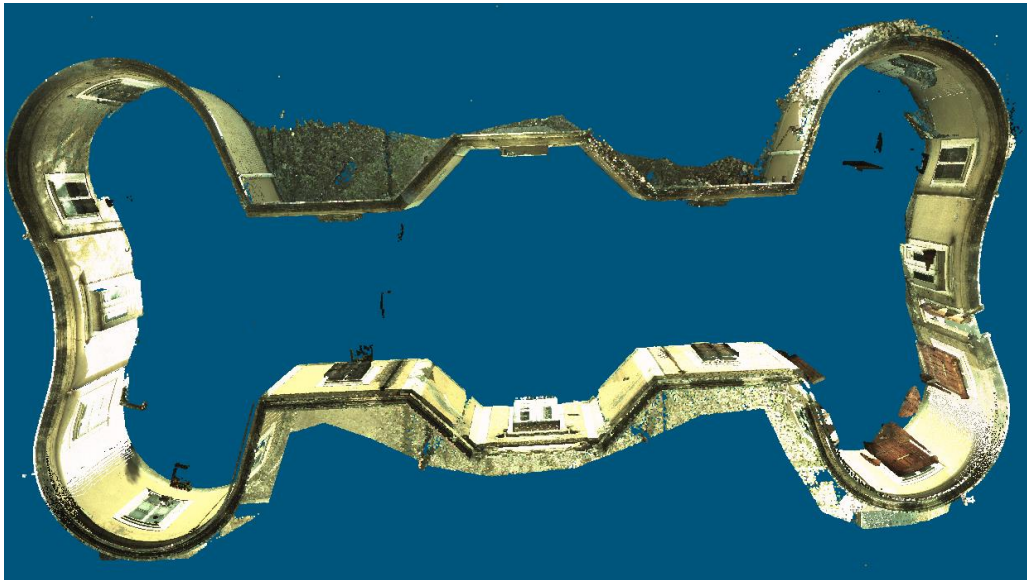


Figura 10 - Pontos representativos das paredes exteriores do observatório

Na modelação das paredes curvas, como aproximação inicial, utilizou-se o cilindro visto ser um sólido que se adapta bastante bem à curvatura das paredes do observatório (Figura 11). Mas, depressa se descobriu que para se poder modelar convenientemente janelas e portas contidas nas paredes curvas teria de se utilizar outro sólido que, para além de representar a curvatura da parede o mais exato possível, tinha também a possibilidade de deixar zonas “abertas”, de forma similar ao planos gerados nas paredes planas, de modo a posteriormente permitir a inserção das janelas e das portas modeladas.

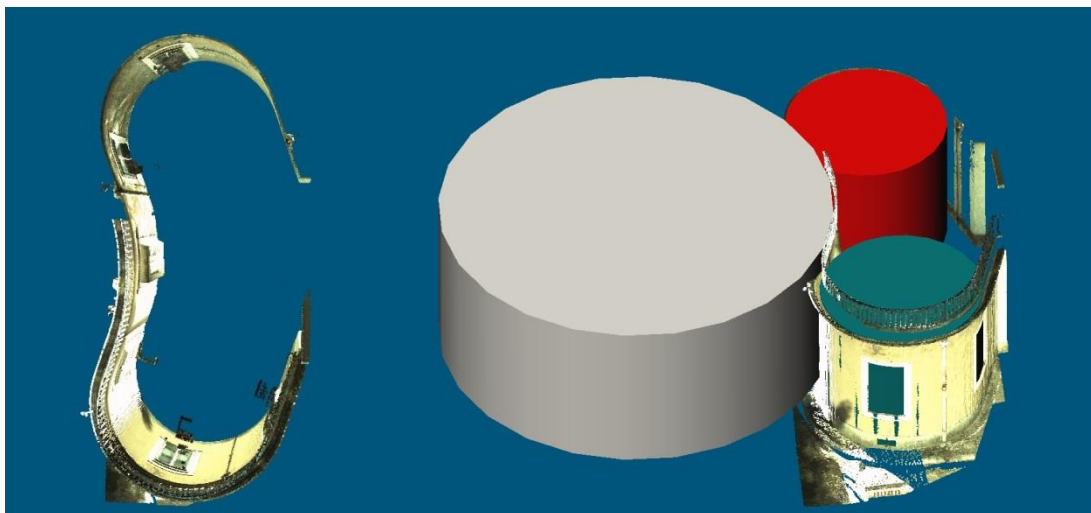


Figura 11 - Cilindros auxiliares utilizados na modelação de paredes curvas

A solução encontrada foi, em cada parede curva, subdividir a nuvem relativa a essa parede em várias secções permitindo a modelação de várias superfícies cilíndricas duplas, o que possibilitou assim a modelação de superfícies apenas nas zonas de parede sem sobrepor às zonas de janelas. Esta superfície geométrica é bastante versátil, no entanto, visto que o *software* utilizado não permite a modelação da superfície cilíndrica dupla diretamente da nuvem de pontos, para cada parede curva foi modelado provisoriamente um cilindro e, a partir deste, utilizando os seu parâmetros (posição XYZ, orientação, raio, altura) modelou-se então cada superfície cilíndrica dupla que era posteriormente editada de modo a modelar apenas as paredes curvas não se sobrepondo sobre as janelas e as portas (Figura 12).



Figura 12 - Paredes curvas modeladas

Na nuvem de pontos consegue-se identificar a existência de um rodapé definido ao longo de todo o edifício, pelo que fazia sentido modelá-lo também. Teoricamente, o rodapé seria facilmente modelado seguindo a mesma metodologia utilizada para a modelação das paredes, porém, estando o rodapé situado junto ao chão, existiam muitas zonas do rodapé para as quais não existiam pontos LiDAR dada a existência de vegetação e outros objetos situados muito perto do edifício. Conforme exemplificado na Figura 13, existiam zonas em que era possível uma extração de alguns pontos do rodapé com uma segmentação mais pormenorizada, sendo que noutros casos não havia nenhum ponto utilizável.



Figura 13 - Lacunas do rodapé na nuvem de pontos

Para colmatar as zonas do rodapé onde não existiam pontos, foram modelados objetos com formas e curvaturas com base nos rodapés circundantes, sendo que a sua colocação foi feita com base no espaçamento médio entre rodapé e parede nas zonas onde foi possível modelar estes dois tipos de objetos.

Depois de aplicada esta metodologia em todas a superfície exterior obteve-se o que se pode denominar o “esqueleto” do modelo do observatório (Figura 14).

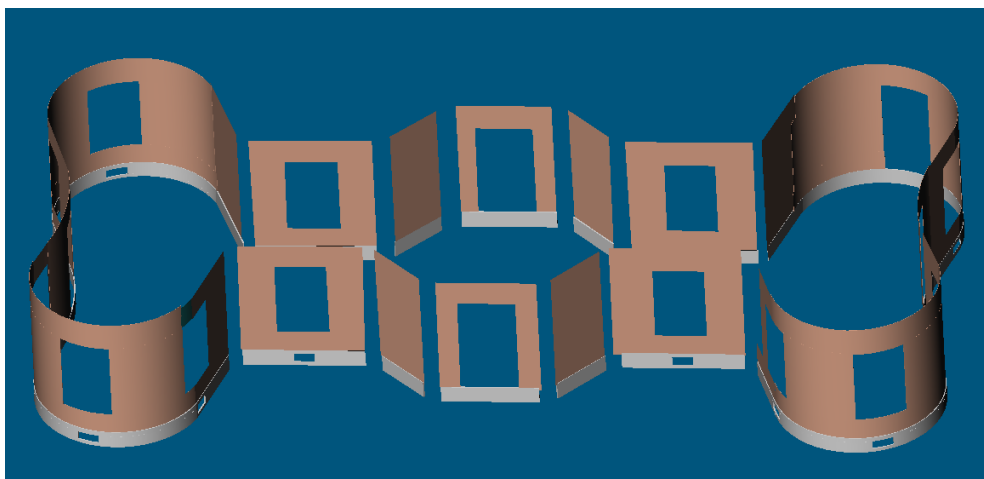


Figura 14 - Representação do “esqueleto” base do modelo 3D

4.1.2 Painéis de ligação

Um dos vários pormenores arquitetónicos deste edifício é a forma como as paredes estão conectadas, existindo um painel de ligação embutido no edifício em cada intersecção de paredes (Figura 15).

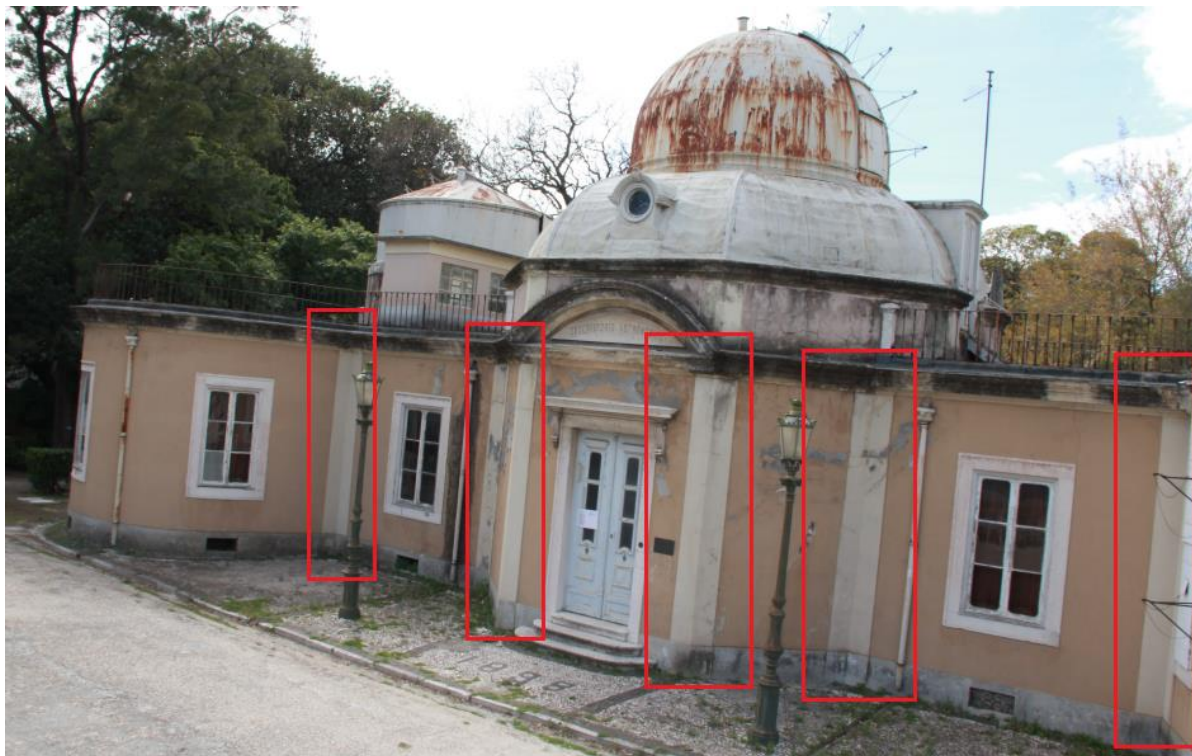


Figura 15 - Conexões entre fachadas (destacadas a vermelho)

A forma destas junções assemelha-se à forma de um retângulo. Para modelar estas formas convenientemente e visto que estas junções são salientes relativamente às paredes, foi utilizado o paralelepípedo de modo a dar espessura e profundidade a cada uma destas junções. Apesar da aparente simplicidade destes painéis de ligação, devido às suas saliências estas tiveram de ser subdivididas em quatro objetos de modo a serem modeladas de um modo preciso. Na Figura 16 encontram-se representados os quatro níveis de profundidade, a bege encontra-se representada a parede, a branco o rodapé que é saliente relativamente à parede, a verde o painel de ligação que se encontra representado saliente relativamente ao rodapé e finalmente a vermelho a zona da junção que intersecta com o rodapé que é a zona mais saliente das quatro aqui descritas.

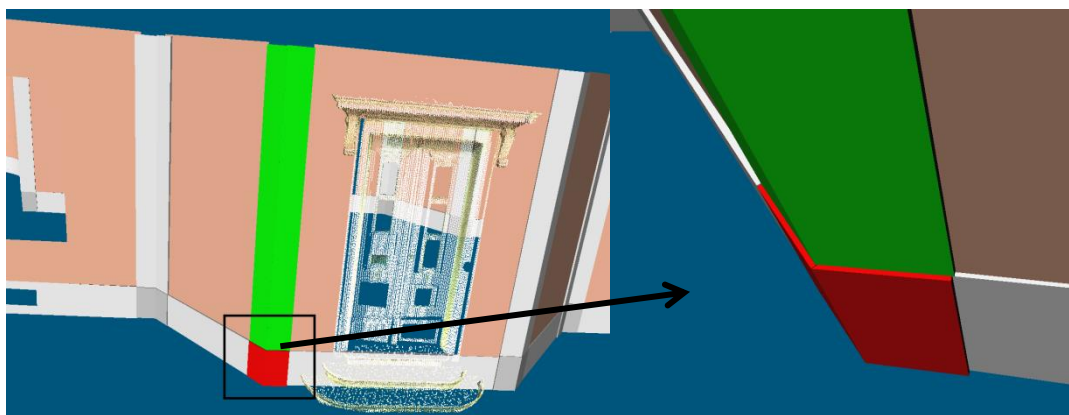


Figura 16 - Representação das profundidades/saliências dos objetos circundantes às junções

4.1.3 Janelas, Portas e Degraus

As janelas e portas do observatório possuem estruturas arquitetónicas bastante singulares que conferem ao edifício um carácter artístico único, pelo que se procurou, com base nos dados disponíveis, a recriação destas zonas com o maior realismo e precisão possíveis.

As janelas do observatório acompanham a forma da parede exterior do edifício. Nas zonas em que a parede é plana, as janelas são planas e nas zonas em que as paredes são curvas as janelas acompanham essa mesma curvatura da parede. Devido à grande densidade da nuvem de pontos, verificou-se que era possível modelar as janelas com uma curvatura realista e as formas arquitetónicas originais. Neste edifício, existem quatro janelas planas todas elas com formas similares. Cada uma destas janelas tem vários níveis de saliência, possuindo um bordo saliente da parede (vão de fachada) e a janela propriamente dita localizada na zona interior da parede. Para recriar todas estas características foram necessárias várias superfícies geométricas: paralelepípedos para a recriação dos bordos e planos na modelação das portas da janela, perfazendo um total de 15 formas geométricas em cada janela plana.

Nas paredes curvas do edifício estão localizadas 3 janelas curvas semelhantes entre si. Estas janelas foram modeladas utilizando também 15 objetos para cada uma delas, mas agora com superfícies cilíndricas duplas de modo a acompanhar a curvatura da parede.

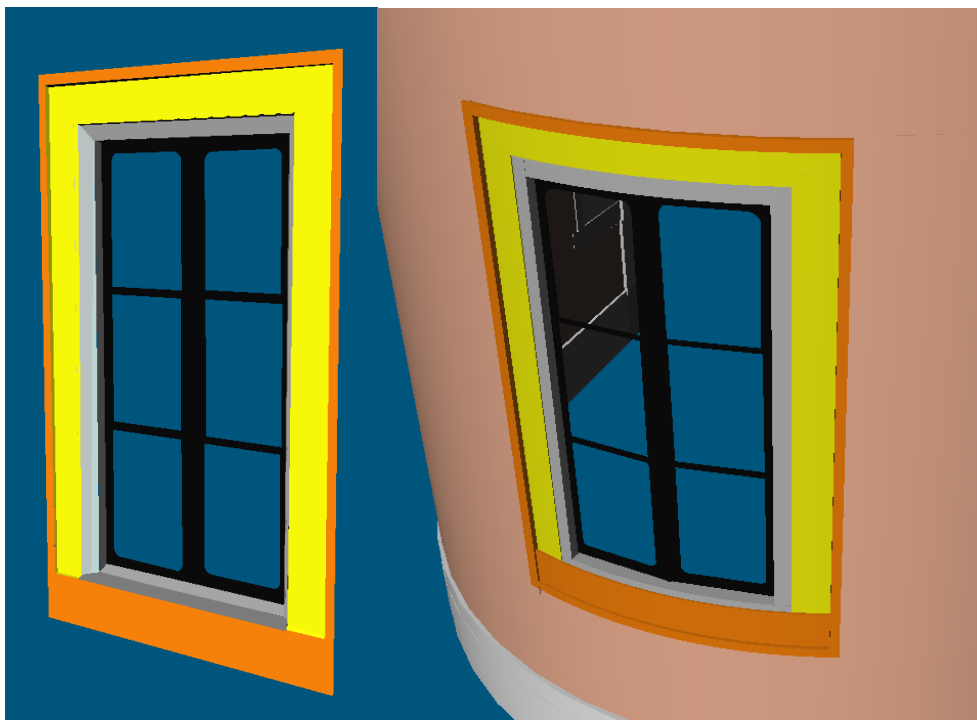


Figura 17 - Exemplo de janela plana (à esq.) e janela curva (à dir.)

No observatório existem ainda janelas situadas entre dois tipos de paredes: parede plana e parede curva, nestes casos inicialmente modelou-se uma janela curva, mas verificou-se que na zona da parede plana esta janela, para além de não ficar esteticamente integrada no edifício, ela se sobrepunha à própria parede e não acompanhava a direção da parede plana que era um dos objetivos definidos para as janelas. Para resolver este problema, em cada uma das 6 janelas nestas circunstâncias foi modelada uma janela com uma parte plana e outra parte

curva, efetuando sempre uma junção suave entre as duas partes de modo a aparentar uma janela minimamente uniforme. Nestas janelas foi ainda feita uma análise minuciosa na nuvem de pontos de modo a verificar a localização exata da zona curva e se esta correspondia à zona de parede curva onde a janela iria ser modelada. Na Figura 18 está representada uma dessas janelas com a zona curva destacada.

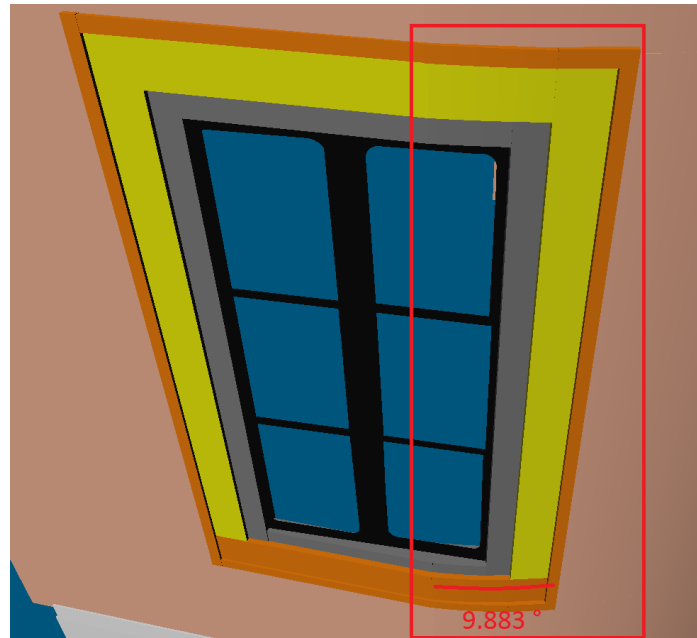


Figura 18 - Janela parcialmente curva

À semelhança das janelas, as portas são bastante ricas em elementos e formas arquiteturais. O observatório possui duas entradas principais, uma localizada na fachada frontal e outra nas traseiras. Estas duas entradas estão localizadas em fachadas planas pelo que seguindo a lógica anteriormente referida, modelaram-se portas planas. Cada uma das entradas possui uma estrutura própria na zona superior que foi modelada fundindo vários paralelepípedos e cilindros.

A entrada propriamente dita, possui duas portas que abrem simetricamente existindo, na junção das duas portas, uma pequena sobreposição. Cada uma destas duas portas possui uma janela vertical que foi modelada através de vários sólidos de pequena dimensão de modo a representar os frisos de cada janela. Para além da janela, cada porta também possui pormenores arquitetónicos com formas bastante peculiares que foram igualmente modelados (Figura 19).



Figura 19 - Pormenores das portas das entradas principais

Cada uma destas entradas possui também um conjunto de degraus exteriores que dão acesso à porta. A modelação destes degraus foi bastante cuidada visto que eles assumem grande importância a nível estético, já que estão situados nas principais entradas do edifício e surgem destacados. Por isso, para além da preocupação com a exatidão dos sólidos modelados, foi também tida em conta a estética do objeto.

Devido à forma de cada degrau, cada um deles foi modelado com duas zonas curvas laterais e uma zona plana central representada por um paralelepípedo. Para tornar a junção das superfícies verticais do degrau com a superfície plana horizontal mais suave e apelativa, foi modelado um bordo redondo disposto ao longo de todo o degrau através de cilindros e várias superfícies tóricas (Figura 20).



Figura 20 - Representação das superfícies geométricas constituintes dos degraus

O observatório possui também três entradas secundárias localizadas nas zonas laterais do edifício. Devido ao facto destas portas estarem inseridas em secções do edifício onde as paredes são curvas, optou-se por modelar as estruturas exteriores de cada porta habitualmente designada de “vão de porta” com curvatura mantendo plana apenas a estrutura da porta em si (Figura 21).



Figura 21 - Portas laterais do observatório

Estas portas apresentam estruturas semelhantes às duas entradas principais, pelo que se optou por modelá-las de forma semelhante, face à insuficiência de dados em algumas destas entradas.

Estando modelada toda a principal estrutura vertical do observatório, sentiu-se a necessidade de introduzir um elemento que completasse esta estrutura de forma suave nas zonas superiores (Figura 22).



Figura 22 - Representação da estrutura vertical do observatório

4.1.4 Bordo superior

Através da visualização da nuvem LiDAR era possível distinguir um bordo superior característico do edifício. Este bordo desenvolve-se por toda a zona superior do observatório, pelo que se procurou uma forma também ela característica para o modelar. Dada a estrutura

deste bordo, verificou-se que a melhor forma de modelar estas secções seria através da conjugação de três cilindros, posicionando dois cilindros de raio igual, um em cima do outro, e ainda um terceiro cilindro de raio menor, de modo a fazer uma ligação à parede menos abrupta.

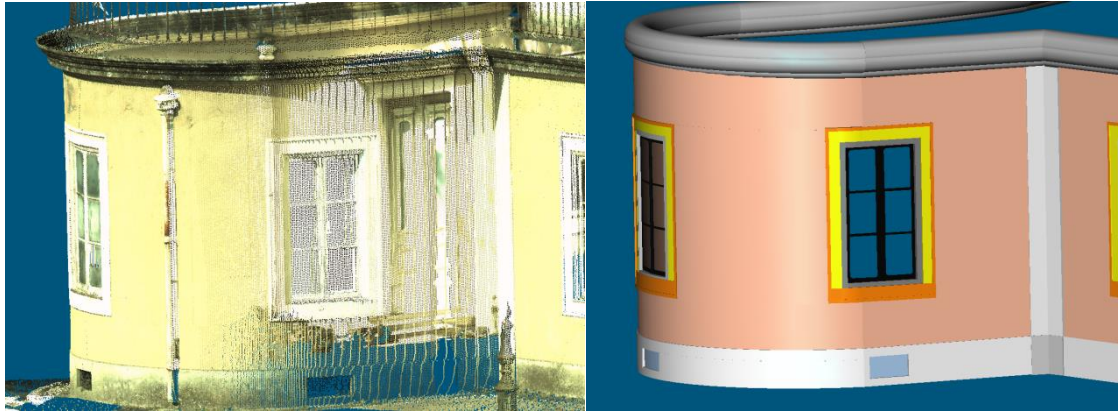


Figura 23 - Bordo superior: nuvem de pontos (à esq.) e modelo 3D (à dir.)

Apesar da modelação através de cilindros ser a melhor a nível estético, tem vários problemas na junção de bordos pertencentes a paredes orientadas em direções diferentes. Aquando da junção de dois bordos contíguos, com duas direções diferentes, era impossível efetuar uma perfeita união dos limites dos cilindros, obtendo-se uma junção com zonas salientes. De modo a solucionar este problema, optou-se por modelar um objeto que permitisse a junção suavizada de bordos com direções diferentes. Utilizou-se então uma superfície tórica para a junção de cada par de cilindros, sendo que em cada junção foram criadas 3 superfícies tóricas visto que cada bordo é constituído por três cilindros (Figura 23). A criação destas superfícies tóricas foi realizada manualmente, visto que o *software* não permite a criação automática deste tipo de objeto de união entre dois cilindros. Por isso, aquando da colocação das junções foi feito um trabalho minucioso de modo a que a junção ficasse o mais suave possível. Através desta metodologia foi possível melhorar esteticamente as junções, sendo que com um elevado grau de *zoom* se denotam algumas irregularidades na transição dos cilindros para a superfície tórica que não são visíveis a uma distância genérica (Figura 24).

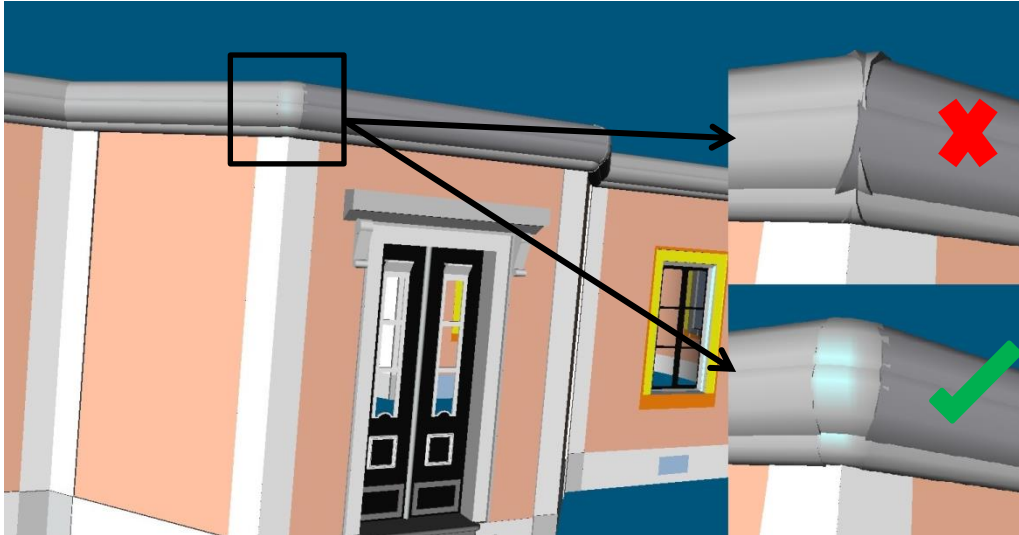


Figura 24 - Interseção entre cilindros sem superfície tórica (em cima) e com superfície tórica (em baixo)

4.1.5 Chão e Terraço

Como a nuvem de pontos foi adquirida através de varrimentos laser com o sensor posicionado no solo dos jardins envolventes do observatório, não existiam pontos relativos ao terraço do edifício. Para modelá-lo, utilizaram-se pontos da nuvem que representavam a superfície circundante do observatório para modelar um plano que seria o “chão” do observatório. Gerado este plano, verificou-se que o seu desvio padrão relativamente à nuvem de pontos era de 0.024 metros, valor elevado para a precisão deste projeto. Este valor advém do terreno não ser totalmente plano em redor do edifício e existirem alguns desníveis normais neste tipo de situações. Para confirmar a exatidão da orientação deste plano comparou-se a direção da normal ao plano com as paredes do observatório. Entre estas duas direções existia uma ligeira diferença pelo que, em última instância, se optou por colocar o plano perpendicular às paredes e limitado pelas mesmas, havendo assim um “encaixe” perfeito entre o chão e o restante modelo.

Para a modelação do terraço e, face à insuficiência de mais dados, utilizou-se uma cópia do chão do edifício elevando-o à altura do bordo superior do observatório limitando-o pelo do bordo superior (Figura 25).



Figura 25 - Terraço do observatório

Na nuvem de pontos era ainda distinguível a estrutura de painéis amovíveis da sala da Meridiana. Visto esta estrutura ser de grande importância, optou-se por modelá-la na sequência da modelação do terraço. Esta estrutura foi modelada através da utilização de paralelepípedos e pequenos cilindros de modo a modelar os vários painéis que constituem a estrutura do mecanismo de abertura (Figura 26).

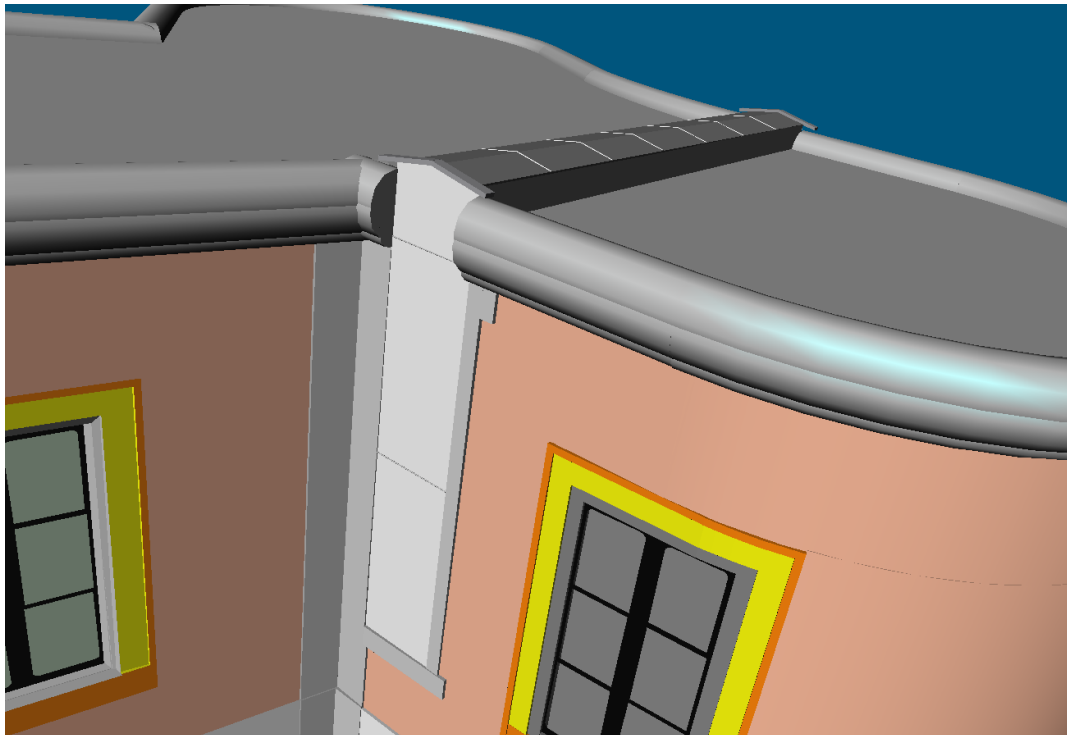


Figura 26 - Painéis de abertura da sala da Meridiana

4.1.6 Cúpulas

Na sua zona superior, o observatório possui três cúpulas, uma cúpula central e duas cúpulas periféricas mais pequenas conferindo uma estrutura arquitetónica ímpar ao edifício. Para além de adicionar carácter a este observatório, estas cúpulas possuem ainda painéis amovíveis, que permitiam a realização de observações astronómicas.

As cúpulas periféricas constituíam pontos de observação astronómica e geodésica para alunos e investigadores. Cada uma delas foi modelada através de cilindros dada a sua estrutura carecer de pormenores. Porém, o telhado foi modelado utilizando a forma de um cone ao invés de uma esfera, onde foi colocada a abertura com os respetivos painéis amovíveis (Figura 27).

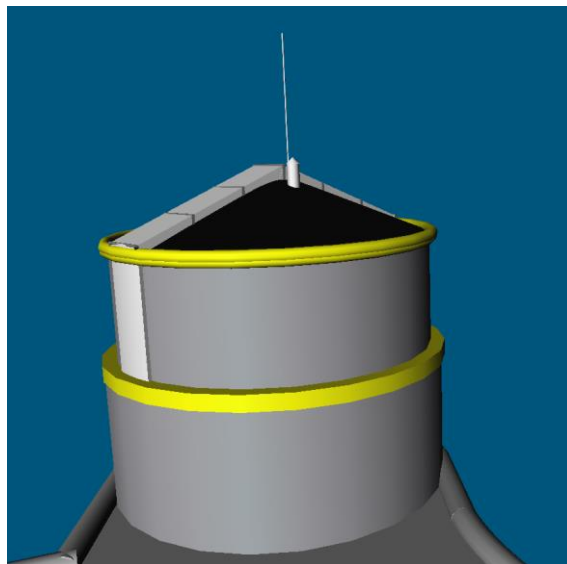


Figura 27 - Cúpula periférica

Devido à sua complexidade estrutural, a cúpula central foi dividida em três níveis. O nível 1 (nível inferior) é uma extensão da zona central do observatório, contendo oito faces com formas similares às paredes do edifício. O nível 2 possui formas bastante peculiares. Neste nível, existem 8 secções curvas intercalas por 8 superfícies tóricas que formam a junção entre as secções curvas contíguas. No nível 3 está localizada uma esfera com painéis amovíveis (Figura 28).

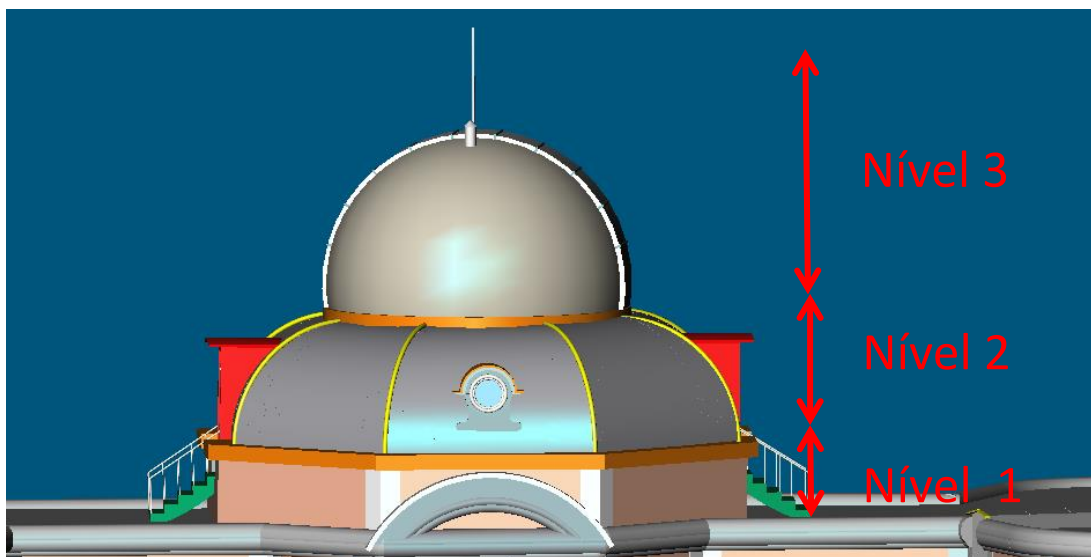


Figura 28 - Cúpula central e seus níveis

Na modelação do nível 1, foi tida em conta a estrutura semelhante entre esta zona da cúpula e as paredes exteriores do observatório. Para tal, foram modeladas as faces da cúpula paralelas às paredes correspondentes utilizando paralelepípedos e mantendo as saliências dos painéis de ligação similarmente ao que se fez nas paredes do observatório.

O nível 2 possui variados objetos, primeiramente, modelaram-se as 8 secções que se assemelham a quartos de cilindro. Estas secções apresentam uma forma bastante peculiar, dado que entre cada secção e as secções vizinhas existe um bordo a efetuar a junção. Estes quartos de cilindro têm curvatura igual mas altura variável dificultando a sua modelação. Para resolver este problema, em cada secção foram modeladas várias superfícies cilíndricas duplas ao invés de apenas uma. Modelou-se uma superfície cilíndrica dupla central na zona em que a altura é constante, mas nas zonas em que a altura varia foram criadas várias superfícies cilíndricas duplas, contíguas entre si, com 5,5 centímetros de largura e com alturas variáveis possibilitando assim a formação de cada uma das superfícies corretamente limitada pelas junções (Figura 29).

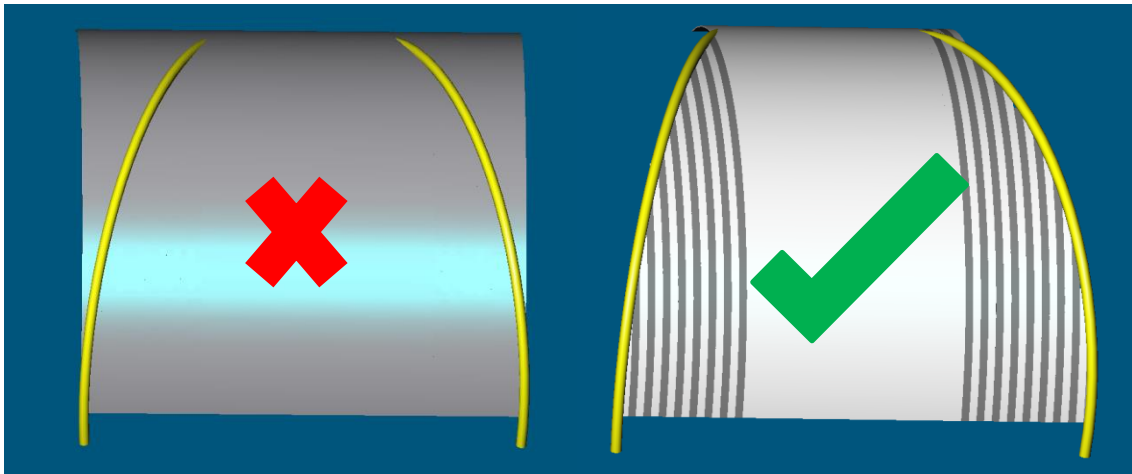


Figura 29 - Comparação da modelação de uma das estruturas da cúpula central com uma superfície cilíndrica dupla (à esq.) e com várias superfícies cilíndricas duplas com alturas variáveis (à dir.)

Para além das secções mencionadas, este nível, possui duas portas inseridas em duas secções opostas. Para estas portas, devido à escassez de pontos da nuvem pelo facto destas estarem localizadas no terraço do observatório, recorreu-se também às fotografias adquiridas a partir do exterior do observatório de modo a possibilitar uma perceção mais exata da forma das portas (Figuras 63 e 64 apresentadas em anexo). Cada uma das portas possui uma armação exterior de suporte modelada através de paralelepípedos e de superfícies cilíndricas duplas, enquanto que a porta propriamente dita foi modelada com planos, pequenas superfícies cilíndricas duplas e paralelepípedos para os pormenores. Cada porta possui também um acesso através de uma pequena escada sendo esta modelada totalmente a partir de fotografias face à insuficiência de pontos LiDAR na zona perto do telhado (Figura 30).

O nível 2 da cúpula possui ainda duas pequenas janelas modeladas através de superfícies cilíndricas duplas e paralelepípedos alinhados com as duas entradas principais do edifício.

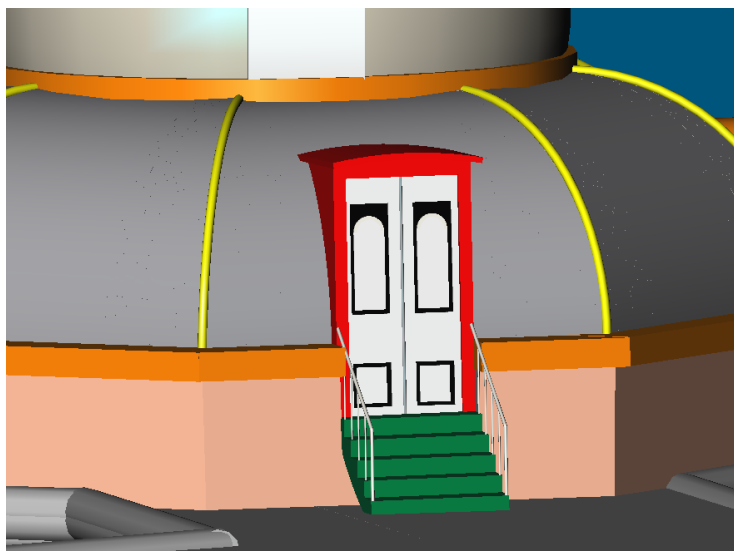


Figura 30 – Porta de acesso à cúpula central

No nível 3, está contido o telhado da cúpula. Este assume uma forma semi-esférica bastante explícita, possuindo uma abertura coberta por vários painéis amovíveis que foram modelados com paralelepípedos e vários cilindros.

No terraço do observatório existe ainda uma pequena estrutura que contém a saída da escada de acesso ao terraço e às cúpulas. A sua constituição é bastante simples, possuindo paredes verticais com janelas quadrangulares, tendo sido todos os seus constituintes modelados através de através de paralelepípedos de várias dimensões.

4.1.7 Gradeamento

O terraço do observatório está limitado por várias grades semelhantes às de uma varanda. Devido ao facto destas estarem colocadas nos limites do terraço do edifício, os dados disponíveis foram suficientes para modelar a maior parte das grades apesar destas estarem na zona superior do observatório.

O gradeamento foi modelado seguindo uma estrutura bastante simples mas adequada à forma real das grades. Cada lanço modelado era composto pelo corrimão, modelado com cilindros e superfícies tóricas em zonas curvas, pelo bordo inferior, modelado através de paralelepípedos e superfícies cilíndricas duplas, enquanto que os ferros verticais do gradeamento eram modelados com cilindros. Devido à existência de um número bastante elevado de cilindros verticais (mais de duzentas unidades) ao invés de cada cilindro ser modelado individualmente foi adotada uma metodologia mais eficiente. Em cada lanço de gradeamento foram criados o corrimão e o bordo inferior e apenas um cilindro vertical. Depois, a partir deste, foram feitas cópias ao longo de todo o lanço. Apesar destes cilindros serem cópias, cada um deles foi colocado na sua posição correta, através de cópias equidistantes constrangidas pelos pontos da nuvem relativos à grade, obtendo-se o mesmo resultado que se obteria se cada cilindro fosse modelado individualmente. Na Figura 31 está representada a nuvem de pontos representada por pontos brancos e cinzentos sobreposta às superfícies geométricas utilizadas no gradeamento, verificando-se uma sobreposição quase perfeita.

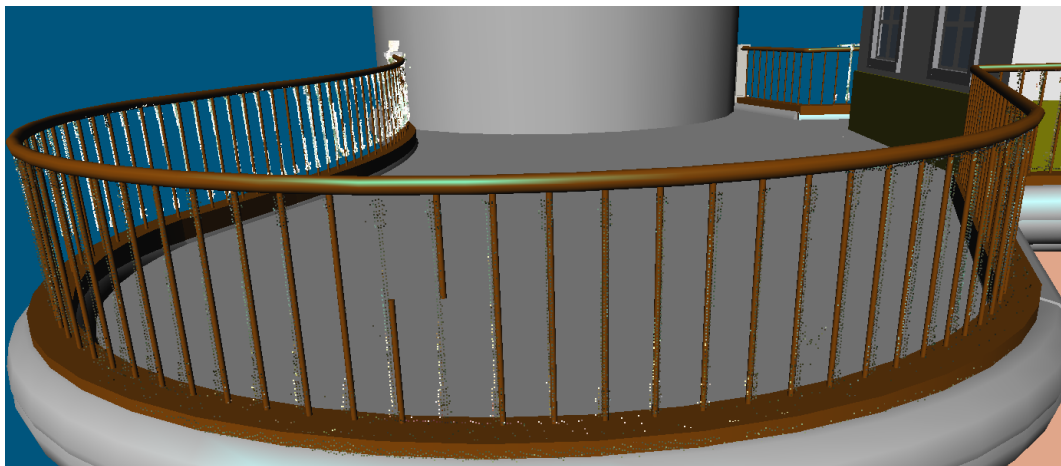


Figura 31 – Representação da exatidão dos constituintes do gradeamento modelado

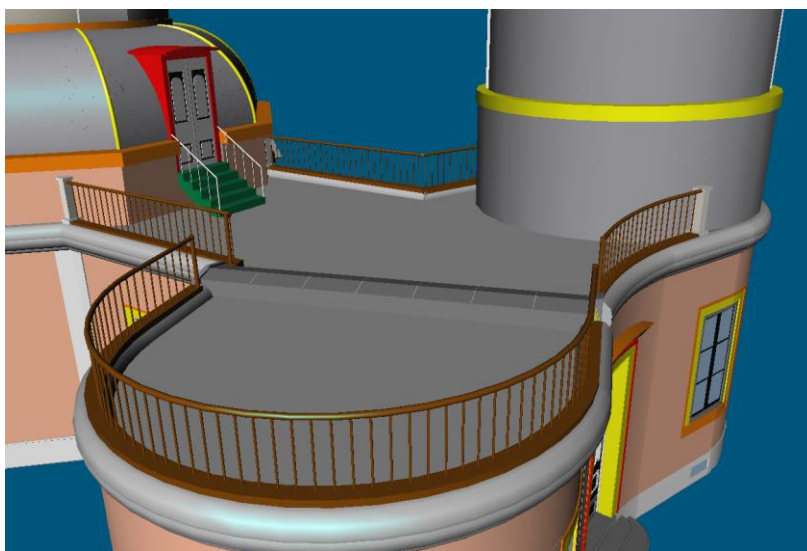


Figura 32 – Gradeamento no terraço do observatório

Visto que a nuvem LiDAR é densa foi possível modelar alguns pormenores menos relevantes do observatório. Os tubos verticais de escoamento de águas são facilmente distinguíveis na nuvem de pontos pelo que se optou por modelá-los e incluí-los no modelo tridimensional.

4.2 Modelação do interior a partir de pontos LiDAR

4.2.1 Sala da Meridiana

Depois de modelada toda a superfície exterior do observatório, passou-se às estruturas interiores. Dada a existência de duas nuvens de pontos relativas à sala da Meridiana, modelaram-se as paredes da sala através de planos e superfícies cilíndricas duplas. Na nuvem de pontos, era ainda possível observar os contornos de um suporte para um círculo meridiano, instrumento que permitia realizar observações astronómicas. Através destas formas distinguíveis na nuvem de pontos modelou-se então o suporte, com o maior detalhe possível, dada a densidade da nuvem nesta zona (Figura 33).

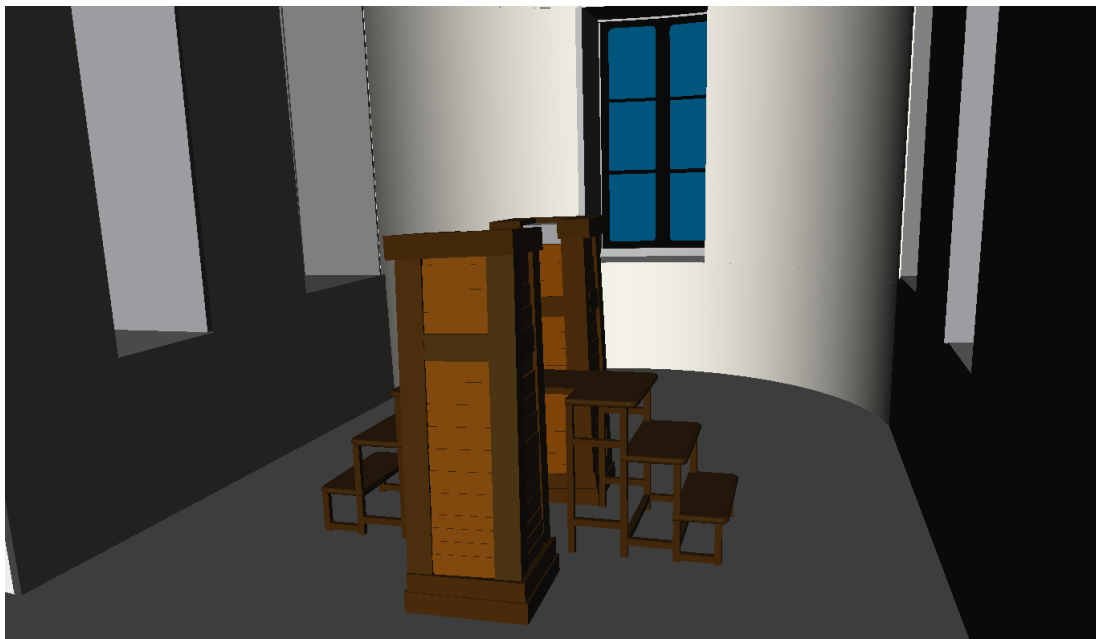


Figura 33 - Suporte do círculo meridiano

A abertura distinguível no terraço do edifício é pertencente à sala da Meridiana, pelo que se modelaram as zonas laterais (visto que a zona superior já havia sido modelada anteriormente), criando uma superfície com painéis amovíveis através da modelação de paralelepípedos e cilindros (Figura 34).

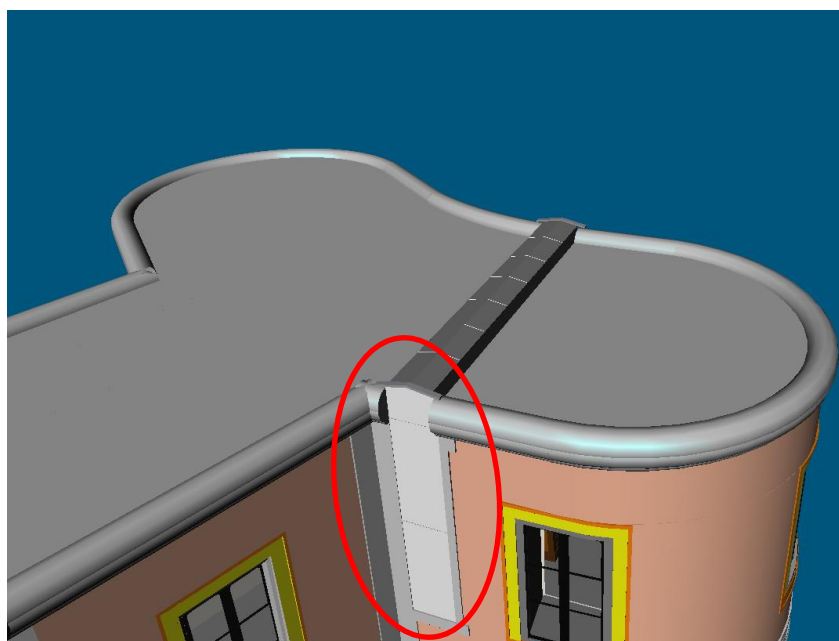


Figura 34 - Painéis laterais da abertura pertencente à sala da Meridiana

Depois de modelada a sala, surgiu um problema. Como era previsível, as paredes da sala da Meridiana, não coincidiam com as paredes exteriores do edifício, existindo um espaço vazio entre as duas estruturas, o que provocava um desfazamento nas janelas e nas portas. Este espaço deve-se à própria espessura das paredes exteriores do edifício cuja espessura é em

média de 0.50 metros, espessura habitual em edifícios antigos. Para colmatar este desfasamento das janelas e portas, optou-se inicialmente por preencher a espessura da parede exterior em todo o modelo, mas verificou-se que esta seria uma metodologia que iria acrescentar mais carga computacional, a um projeto já ele bastante “pesado” devido ao realismo e à pormenorização de todos os detalhes do edifício. Para evitar este grande acréscimo de objetos no modelo, optou-se por uma solução mais simples e igualmente realista, sendo este um modelo tridimensional cujo objetivo principal é a navegação tridimensional no exterior e no interior do modelo. Limitaram-se assim apenas os desfasamentos nas zonas de janelas e portas, deixando um espaço vazio no resto da parede, espaço este que nunca vai ser exibido na navegação do modelo, pois o seu acesso exterior está limitado pela parede exterior do observatório e o acesso interior está limitado pela parede da sala da Meridiana, tornando-o uma área “não-navegável” (Figura 35).

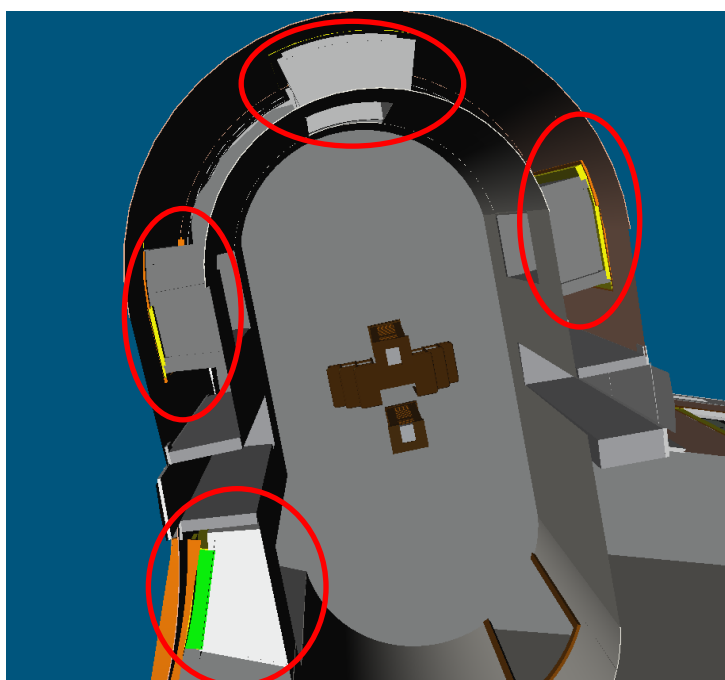


Figura 35 – Limites dos desfasamentos em janelas e portas da sala da Meridiana

4.2.2 Sala central

Nesta fase do projeto, e não havendo mais dados relativos à nuvem de pontos para modelar, pensou-se que o interior do observatório do modelo iria ter apenas a sala da Meridiana. No entanto, após uma visita ao observatório para aquisição de fotografias que posteriormente iriam ser utilizadas para texturas, verificou-se que existiam mais divisões do observatório potencialmente modeláveis, apesar de não existirem dados LiDAR dessas divisões, ficando assim o modelo mais completo.

Durante a visita ao observatório verificou-se a existência de duas salas ainda fisicamente acessíveis, apesar do iminente risco de colapso do teto e do chão, que poderiam eventualmente ser modeladas a partir de fotografias. O observatório possui uma sala central, acessível através da entrada principal do observatório e da entrada das traseiras. Como as

paredes da sala eram paralelas às paredes exteriores do edifício nesta divisão, modelaram-se os limites desta sala octogonal com base nas paredes exteriores e utilizou-se o valor de espessura da parede do edifício (0.50 metros) de modo a colocar as paredes num local aproximado da sua posição correta (Figura 36).

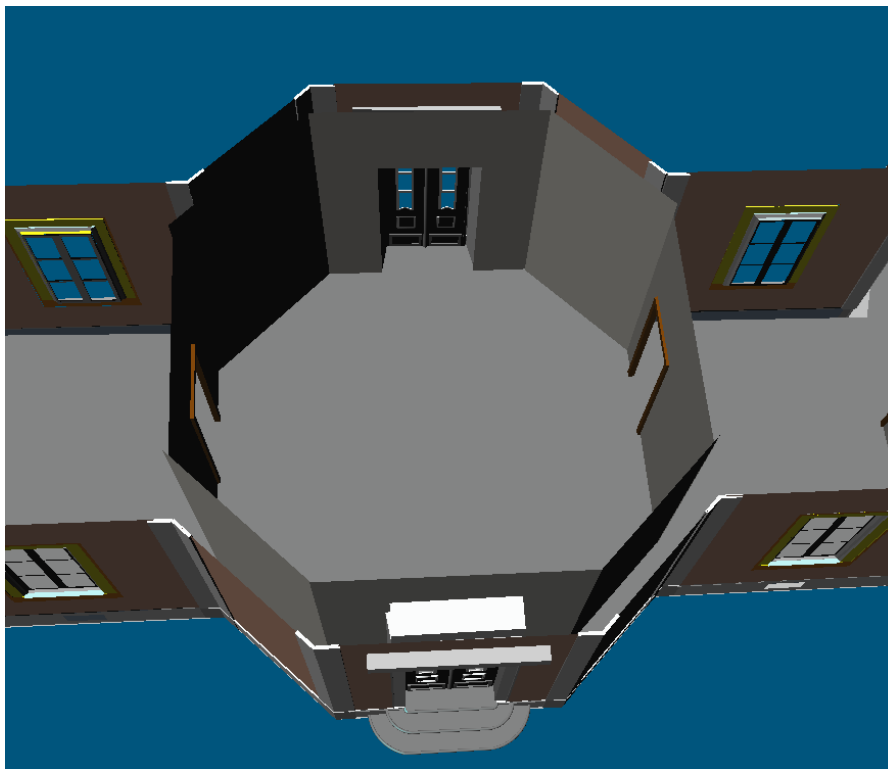


Figura 36 – Sala central

Nesta sala, e à semelhança da metodologia utilizada na sala da Meridiana, modelaram-se os limites das portas, limitando assim o desfasamento entre as paredes interiores da sala central e as paredes exteriores. Nesta divisão existe ainda um pilar central, também ele característico do observatório que foi posteriormente modelado no centro da sala.

4.2.3 Sala de aula

A outra sala acessível era uma sala de aula, localizada na zona do observatório oposta à sala da Meridiana. Nesta sala foram adquiridas várias fotografias de modo a possibilitar a modelação dos vários constituintes da mesma (Figura 37).



Figura 37 – Fotografia da sala de aula do observatório

Primeiramente, modelaram-se as paredes da sala. Neste caso assumiu-se que as dimensões seriam as mesmas da sala da Meridiana, visto que o observatório é simétrico relativamente à disposição das suas divisões. Mais uma vez foi tida em conta a espessura da parede (0.50 metros) na colocação das paredes e dos limites das janelas e portas (Figura 38).

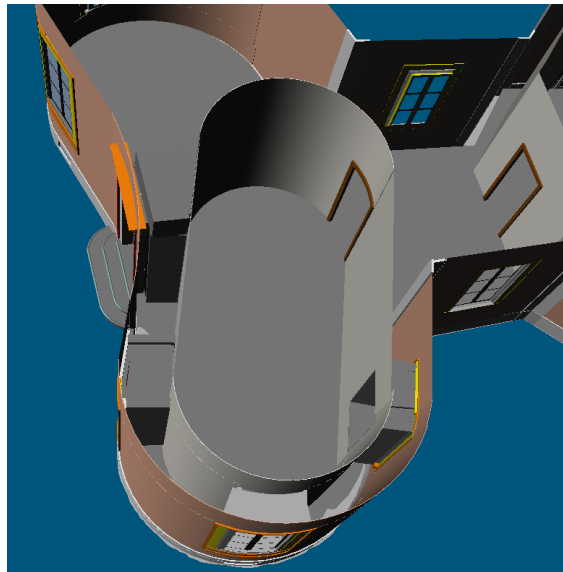


Figura 38 – Estrutura base da modelação da sala de aula

Nesta sala existem elementos típicos de uma sala de aula: um quadro, uma mesa principal e várias secretárias espalhadas pela sala. Relembrando o facto de que esta sala iria ser modelada apenas com base em fotografias, era imperativo seguir uma metodologia que permitisse a modelação de todos os constituintes com a dimensão certa e nas suas posições corretas (ou numa posição muito aproximada). Para tal, utilizou-se uma das fotografias da sala para encontrar as dimensões reais dos elementos da sala de aula, através de uma localização comum à foto e ao modelo 3D que fosse facilmente mensurável para referência. Como se pode ver na Figura 39, o canto superior direito do quadro está alinhado com um dos

pormenores da janela situado a meio da altura total da janela. Pressupondo-se que a foto foi obtida numa direção paralela ao chão da sala, assumiu-se que estas duas localizações (o canto superior do quadro e o pormenor da janela) se encontravam à mesma cota.

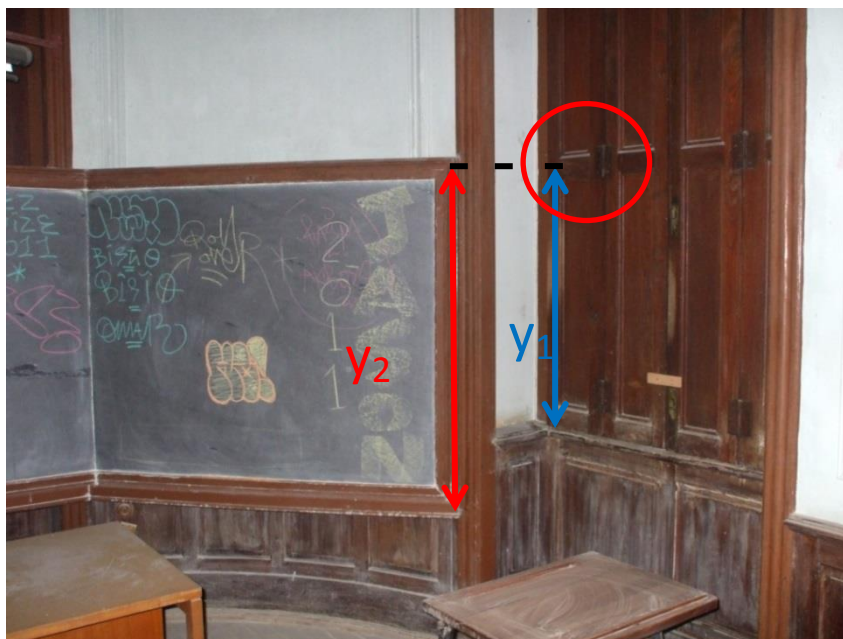


Figura 39 - Representação, na foto, das medições utilizadas no dimensionamento do quadro (com destaque no pormenor da janela)

Com base nestes pressupostos, foi possível extrapolar a dimensão y_2 que representa a altura do quadro, em ordem a y_1 que representa a distância desde a base da janela até ao pormenor seleccionado (Figura 40). Estas distâncias foram medidas grosseiramente na imagem contabilizando o número de pixéis, e através destas duas medições chegou-se à conclusão de que $y_2 = 1.3568 y_1$.

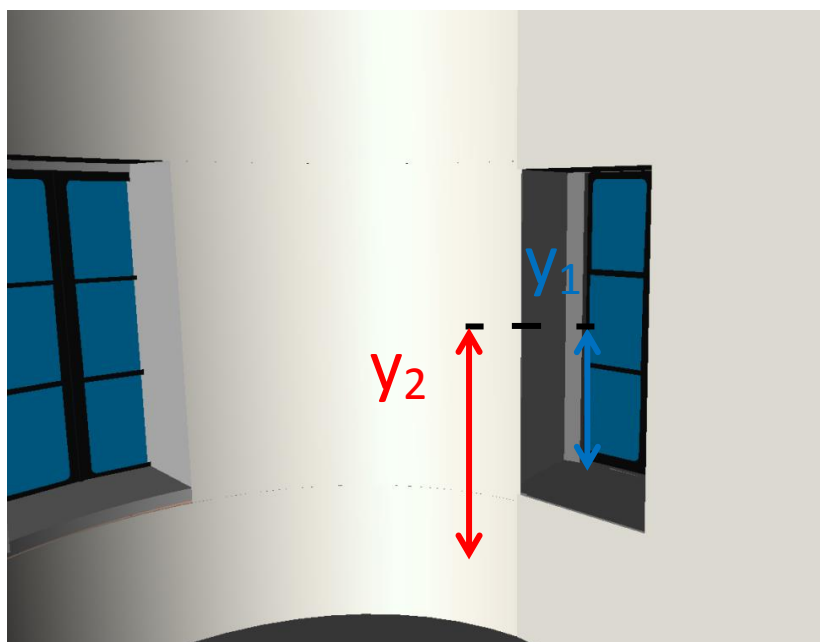


Figura 40 - Representação, no modelo, das medições utilizadas no dimensionamento do quadro

Com base nas medições anteriores e, visto que a distância y_1 é facilmente mensurável no modelo, era assim possível colocar a estrutura do quadro com base no valor de y_2 correspondente à altura do quadro (Figura 41).

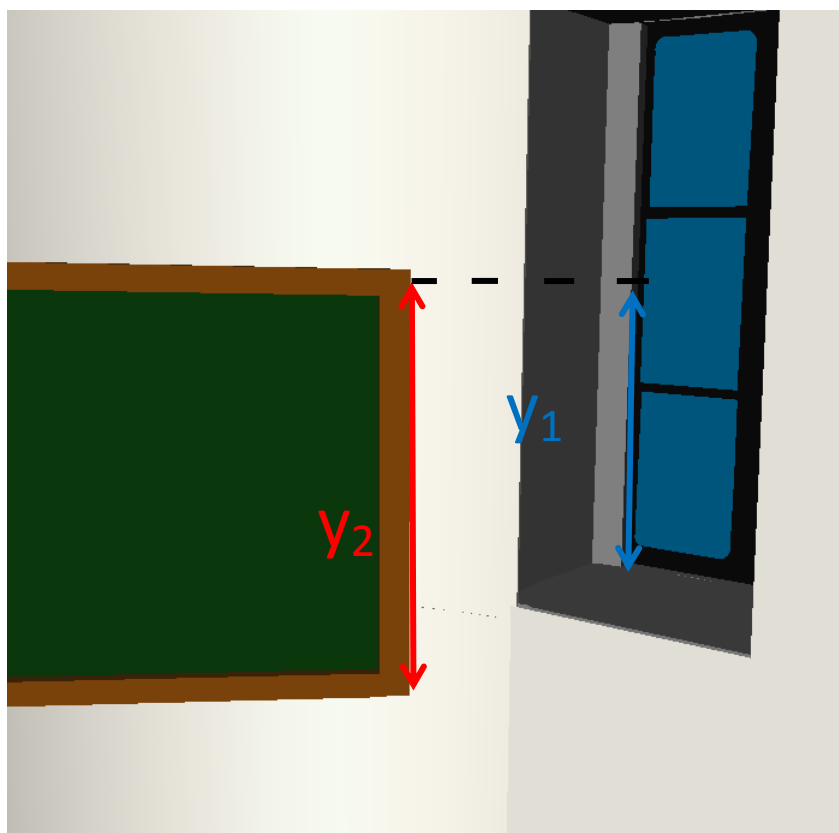


Figura 41 - Quadro pertencente à sala de aula

A partir daí foi possível modelar o quadro na posição mais exata possível, e utilizando o quociente destas distâncias como fator de escala, foram modelados todos os objetos presentes na sala dimensionando-os corretamente.

A secretária de professor foi modelada usando paralelepípedos, enquanto que as secretárias dos alunos foram modeladas com paralelepípedos e com cilindros. Relativamente às cadeiras, foi criado um conjunto de objetos pormenorizados de modo a dar um aspeto realista e atraente a estas estruturas, sendo cada uma delas composta por 19 superfícies geométricas (Figura 42).

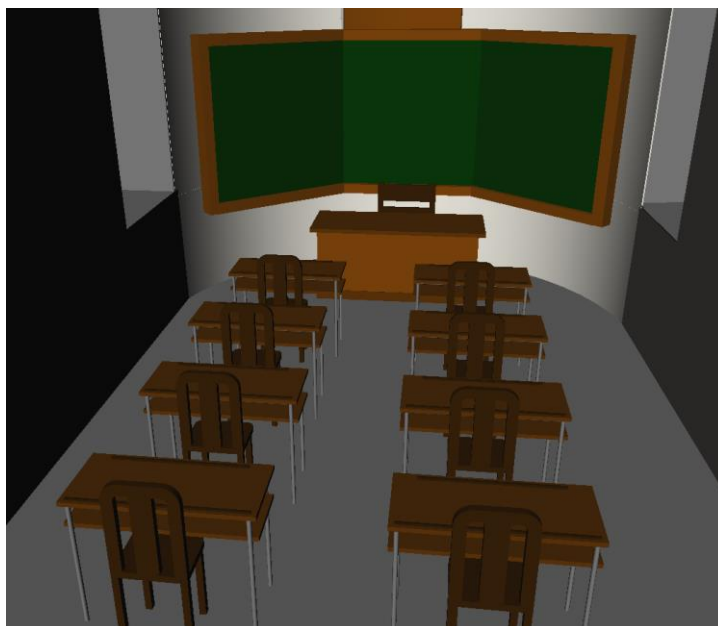


Figura 42 – Representação panorâmica da sala de aula

Estas duas salas e a sala da Meridiana permitem obter um modelo do interior do observatório mais completo e moderadamente preenchido sem nunca desprezar a exatidão de todos os objetos modelados. Porém, e, visto que um dos objetivos finais é criar um modelo que permita a navegação tridimensional, modelaram-se dois corredores entre as salas com o propósito de fazer a ligação entre as três divisões do edifício (Figura 43).

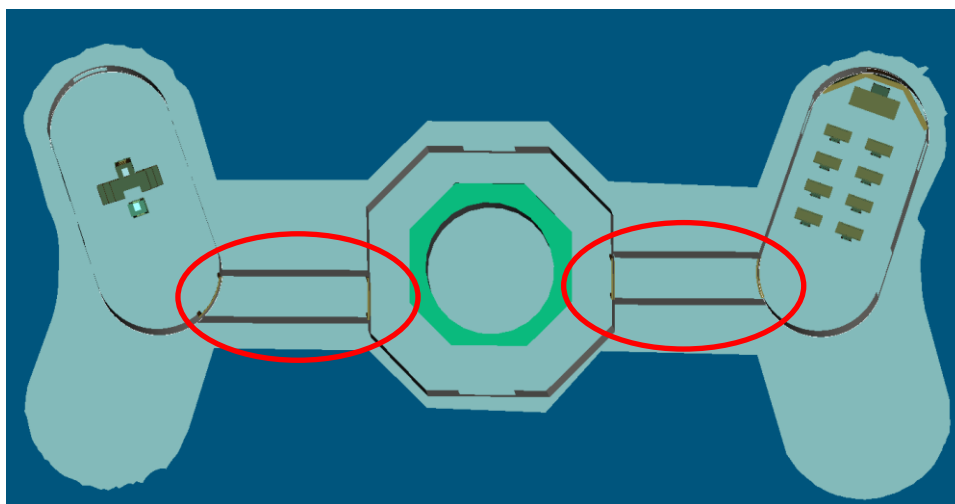


Figura 43 – Corredores modelados no interior do observatório

A inclusão dos corredores obrigou a alterações na superfície exterior, nomeadamente em algumas janelas. Dado que as janelas são translúcidas, nas zonas dos corredores, as janelas mostravam apenas a parede do corredor, o que esteticamente não era apelativo. Para minorar este facto foram criados planos nas janelas de modo a representar vidros opacos (Figura 44).



Figura 44 - Objetos colocados nas janelas de modo a torná-las opacas

Nesta fase, todo o edifício encontrava-se modelado e foram aplicadas cores mais realistas a todas as superfícies de modo a torná-lo esteticamente atractivo. Na Figura 45 encontra-se representada a fachada principal do edifício, nas Figuras 65 e 66 apresentadas em anexo encontram-se outras perspetivas relevantes do modelo 3D.



Figura 45 - Modelo 3D com cores realistas

4.3 Aplicação de texturas

4.3.1 Superfície exterior

As texturas são uma componente fundamental na produção de modelos tridimensionais. Neste caso, as texturas assumem um papel ainda mais importante visto que este modelo é bastante pormenorizado e se pretende, objetivamente, torná-lo muito parecido ao edifício na realidade.

Para a aplicação das texturas foram utilizadas fotografias de dois trabalhos de campo distintos: para toda a superfície exterior foram utilizadas fotos adquiridas no âmbito de outro projeto de fotogrametria, enquanto que as fotografias do interior foram obtidas com o intuito de serem utilizadas para as texturas deste projeto em particular.

A precisão requerida para aplicação de textura foi um fator a ter conta, visto as fotografias do exterior do edifício possuírem pouca especificidade nos pormenores. As fotografias tinham sido obtidas a partir de posições mais distantes de modo a incluir vários elementos do exterior do observatório numa mesma fotografia, perdendo-se assim resolução nos pequenos detalhes da superfície exterior do edifício.

Antes da aplicação de texturas verificou-se que o *software* não permitia essa operação diretamente sobre as superfícies modeladas geometricamente, pelo que, antes de se iniciar este processo, todo o modelo teve que ser convertido para *mesh*. Este processo foi bastante moroso devido à quantidade de objetos a converter (cerca de 8000 objetos), perdendo-se nesta conversão alguma exatidão dada a impossibilidade de criar *meshes* densas devido a limitações computacionais. De facto, devido ao grande número de objetos o modelo 3D ficava demasiado “pesado” para ser posteriormente trabalhado. Apesar de apenas ser mensurável manualmente, a exatidão da *mesh* obtida é bastante boa notando-se algumas incoerências apenas em objetos curvos, sendo esta falta de exatidão posteriormente ocultada pela própria textura (Figura 46).

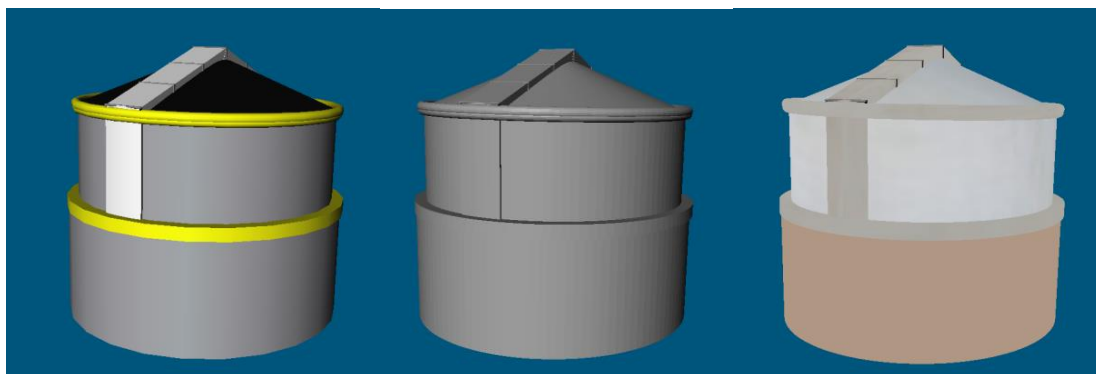


Figura 46 – Representação das várias etapas de conversão de objetos na aplicação de textura: superfícies geométricas (à esq.), *meshes* (ao centro), *meshes* com textura (à dir.)

Como acontece em outros *software*, no *Trimble Realworks*, a aplicação de textura é feita em duas fases: a primeira consiste na importação e na referenciação da fotografia a utilizar na textura relativamente ao modelo (já convertido em *mesh*) e a segunda fase na seleção de *meshes* sobre as quais se pretende aplicar a textura da fotografia.

A fase da aplicação que carece mais atenção é a primeira, já que uma boa referenciação é fundamental para a correta aplicação da textura. Nesta fase, selecciona-se uma fotografia referenciando-a com base no modelo 3D construído pelas *meshes* utilizando, no mínimo, 4 pontos homólogos na foto e no modelo tridimensional. Esta tarefa veio a revelar-se bastante problemática principalmente em objetos de menor dimensão. A segunda fase consistia apenas na escolha das superfícies (*meshes*) sobre as quais seria aplicada a textura da fotografia seleccionada.

Primeiramente, optou-se por colocar as texturas em todas as paredes exteriores do observatório. No entanto, as paredes estão bastante danificadas com danos visíveis e esteticamente negativos, pelo que se optou por fazer edição prévia das fotografias em *software* apropriado. O programa utilizado foi o GIMP, um *software open source* de edição e criação de imagem vocacionado especialmente para edição de fotografia.

Para evitar que as paredes do observatório ficassem com cores diferentes devido à luminosidade variada aquando da aquisição das fotografias fez-se a edição das mesmas de modo a tentar obter uma textura uniforme em todas as paredes (Figura 47).



Figura 47 - Representação da edição feita nas fotografias

As janelas do observatório possuem várias estruturas de pequena dimensão e, dado que as fotografias utilizadas na superfície exterior do edifício não continham grande enfoque nos pormenores, sentiu-se a necessidade de utilizar várias fotografias para uma mesma janela. Para tal, referenciou-se cada fotografia relativamente a uma parte da janela de modo a obter-se uma textura mais precisa. Para a textura de cada janela foram referenciadas três fotografias, uma para a estrutura do vão de fachada (Figura 48) e duas fotos para a estrutura interior da janela.



Figura 48 - Distribuição de pontos homólogos na referênciação da estrutura do vão de fachada da janela

À semelhança das janelas, as portas são ricas em pormenores arquitetónicos de pequena dimensão dificultando a aplicação de textura. Em cada porta foram necessárias, em média, 6 fotografias, com 12 pontos homólogos (entre fotografia e modelo 3D), para posicionar a textura fotográfica de forma rigorosa dada a importância das portas no modelo (Figura 49).



Figura 49 - Distribuição de pontos homólogos nas portas

Nos degraus, verificou-se que as fotografias disponíveis não permitiam uma aplicação de textura apelativa, e dada a indisponibilidade de aquisição de mais fotografias do exterior do observatório devido ao facto de ele estar tapado com painéis protetores (Figura 3), optou-se por não aplicar textura fotográfica em todos os degraus.

No bordo superior, sendo esta secção constituída por vários cilindros, aquando da aplicação da textura, sentiu-se a necessidade de utilizar fotografias de vários ângulos para uma completa cobertura, pelo que para cada superfície geométrica foram utilizadas, no mínimo, duas fotografias utilizando a sua textura fotográfica.

Relativamente aos elementos do terraço do observatório, dada a sua localização e pouco enfoque por parte das fotografias visto que é uma zona muito alta relativamente ao solo, foi feito um estudo da potencial utilização das fotografias na aplicação textura a esta zona do edifício. No terraço propriamente dito, foi mantida a cor da superfície geométrica visto que este não se encontrava representado em nenhuma das fotografias. Quanto às cúpulas periféricas, procedeu-se a uma edição de imagem bastante acentuada de modo a poder ser aplicada a textura presente nas fotografias mantendo a coerência com as texturas dos restantes objetos. Na cúpula central, dada a sua forma, foi possível utilizar as fotografias para a aplicação da textura, tendo sido utilizadas 12 fotografias, em virtude da sua complexidade de formas. Optou-se por deixar as portas de acesso à sala no interior da cúpula sem textura. O gradeamento, visto que possui formas curvas de pequena dimensão foi deixado com a cor das superfícies geométricas, de modo a criar um aspeto de brilho ao longo de todo o gradeamento.

Tabela 2 - Número de pontos homólogos utilizados em cada tipo de objeto da superfície exterior

Tipo de objeto	Número de pontos homólogos utilizados por foto	Número médio de fotos utilizadas
Parede	4	1
Janela	15	3
Porta	25	6
Bordo superior	8	3
Rodapé	6	1
Degraus	---	---
Pilares	8	4
Piso do terraço	---	---
Cúpula central	6 a 10	12
Cúpula periférica	6	5

4.3.2 Superfície interior

No interior do observatório, dado que as fotografias foram adquiridas no âmbito deste projeto, foi possível uma aplicação de textura mais assertiva e esteticamente apelativa.

Na sala da Meridiana, coberta por madeira de mogno, material característico desta sala, foi aplicada a textura em todas as paredes, incluindo o chão e o teto, utilizando-se 8 fotografias obtidas na visita ao observatório. Dada a importância dos elementos das paredes desta sala

foram ainda retratados os pormenores presentes nas paredes. A aplicação da textura contendo todo este pormenor só foi possível graças à cobertura fotográfica feita aquando do levantamento por *laser-scanning* permitindo assim distinguir na nuvem de pontos, através da cor, todos os relevos e limites destes pormenores decorativos (Figura 50).



Figura 50 - Pormenores decorativos da sala da Meridiana

Para além de todos estes pormenores, também o suporte do círculo meridiano é um elemento em grande destaque nesta sala. Dadas as condições de sujidade da sala e do suporte, optou-se por utilizar apenas algumas texturas fotográficas no suporte e deixar as restantes com a cor sintética das superfícies geométricas (Figura 51).



Figura 51 - Sujidade do suporte do círculo meridiano

Nos restantes elementos da sala, nomeadamente nos preenchimentos dos desfasamentos entre a parede exterior e a parede interior nas zonas de janelas e portas, foi aplicada uma textura fotográfica genérica de parede ao invés da simples parede branca retratada em algumas das fotografias.

Na sala central, o elemento que mais se destaca visualmente é o mosaico do chão, com um *design* colorido bastante característico da época. Optou-se, assim, por reproduzir o mosaico a partir da foto representada na Figura 52. Aplicou-se um tratamento prévio da imagem, de modo a tentar que não houvesse mosaicos incompletos, permitindo assim a interligação perfeita de mosaicos utilizando a mesma imagem várias vezes em posições contíguas.

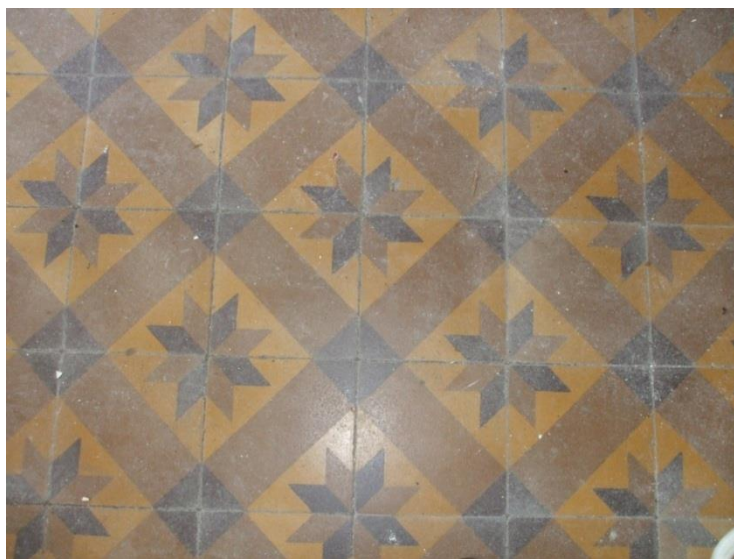


Figura 52 - Fotografia do mosaico da sala central do observatório

Apesar de toda a pré-preparação, na textura aplicada de várias fotos contíguas os limites dos mosaicos nas transições de fotografias não coincidiam. Para resolver este problema, optou-se pela criação de uma imagem de grandes dimensões para a aplicação de textura em todo o chão da sala central. Assim, foi utilizada uma imagem com 15088 x 6640 pixels formada pela imagem do mosaico original, copiada contiguamente na vertical e na horizontal, com os limites dos mosaicos alinhados, formando uma imagem de grandes proporções. Posteriormente foram aplicadas duas cópias desta imagem, acertando os limites dos mosaicos, criando, uma textura uniforme e com transições suavizadas em toda a estrutura do chão retratado na sala central (Figura 53).



Figura 53 – Textura aplicada no chão da sala central

Nos restantes objetos modelados na sala, optou-se por utilizar uma textura de parede branca rebocada para as paredes, uma vez que as mesmas, retratadas nas fotografias, eram totalmente brancas e, aquando da aplicação das texturas fotográficas as paredes do modelo 3D ficavam sem profundidade e sem efeitos de cor. Esta estratégia produziu um resultado visualmente mais apelativo.

Na sala de aula, à semelhança do que acontecia na sala da Meridiana, alguns dos objetos estavam cobertos de pó e resíduos de lixo, pelo que todas as fotos utilizadas na aplicação de textura nesta sala foram previamente editadas, de modo a mitigar este lixo inestético. Na aplicação de textura do quadro, foram utilizadas fotografias tiradas num quadro de aulas genérico, ao invés do empoeirado quadro da sala de aulas do observatório, permitindo assim criar um modelo de sala de aula esteticamente mais apelativo. Para todos os objetos pertencentes às mesas foram utilizadas fotografias obtidas na visita ao observatório, enquanto que nas cadeiras se optou por utilizar uma textura de madeira genérica. Nas paredes da sala, e à semelhança do que aconteceu na sala central, foi utilizada uma textura de parede com reboco branco de modo a proporcionar alguma profundidade na cor (Figura 54).



Figura 54 - Modelo 3D da sala de aula

Tabela 3 - Número de pontos homólogos utilizados em cada tipo de objeto no interior do observatório

Tipo de objeto		Número de pontos homólogos utilizados por foto	Número médio de fotos utilizadas
Sala da Meridiana	Parede	5	8
	Suporte de instrumento	4	6
	Pormenores paredes	8	7
	Abertura	4	3
Sala Central	Mosaico	4	2
	Paredes	4	4
	Pilar central	4	3
Sala de Aula	Quadro	4	5
	Paredes	5	8
	Mesas	6	10
	Cadeiras	4	5

4.4 Modelação de objetos a partir de fotogrametria

4.4.1 Teodolito

Para uma melhor conservação dos instrumentos anteriormente existentes no observatório, os mesmos não se encontram no interior do edifício. Os instrumentos recuperados encontram-se armazenados num depósito nas instalações do Museu da Ciência da Universidade de Lisboa devidamente catalogados e armazenados.

De modo a modelar alguns destes instrumentos históricos, procurou-se uma técnica de modelação de dados que se ajustasse às condições de aquisição de dados. Optou-se então por utilizar, em detrimento do varrimento laser, uma técnica de reconstrução tridimensional através de métodos fotogramétricos. Para tal, foram adquiridos dados de alguns dos instrumentos disponíveis sob a forma de fotografia e vídeo, visando a reconstrução dos objetos usando o método da estrutura a partir do movimento com recurso ao *software* de reconstrução tridimensional *VisualSFM*.

Através desta técnica foram adquiridos dados de dois instrumentos pertencentes ao observatório: o círculo meridiano, outrora colocado na sala da Meridiana, e um dos teodolitos utilizados pelo observatório. Os dados necessários para o processamento da reconstrução tridimensional de objetos no *VisualSFM* são apenas sequências, ordenadas ou não, de fotografias do objeto que se pretende reconstruir. Estas foram então adquiridas em número redundante e com uma grande margem de sobreposição, de modo a tentar proporcionar bons resultados.

O teodolito escolhido para modelação encontra-se armazenado numa sala do Museu da Ciência da Universidade de Lisboa conjuntamente com outros instrumentos pertencentes ao observatório astronómico. Este instrumento era anteriormente utilizado na medição de ângulos verticais e horizontais nas áreas de Topografia e Geodesia. Os dados deste instrumento foram adquiridos utilizando uma câmara fotográfica *fujifilm finepix a800* gravando-se um vídeo de resolução 320 x 240 pixels contendo perspetivas do teodolito, o que permitiu uma visão panorâmica de aproximadamente 200°. Dado o teodolito estar colocado numa mesa de difícil transporte perto de uma das paredes da sala, não foi possível movê-lo, devido ao seu peso, de modo a serem adquiridos dados com uma visão de 360° do objeto.



Figura 55 – Fotografia do teodolito modelado

O vídeo adquirido foi posteriormente dividido e utilizaram-se as *frames* como fotografias com uma resolução de 320 x 240 pixels.

O processamento das 1125 fotografias assim obtidas foi feito no *VisualSFM* utilizando as capacidades de reconstrução deste *software*, permitindo assim obter uma nuvem de pontos com o intuito de permitir a modelação do instrumento no *software Trimble Realworks* já utilizado para as nuvens obtidas por *laser-scanning*.

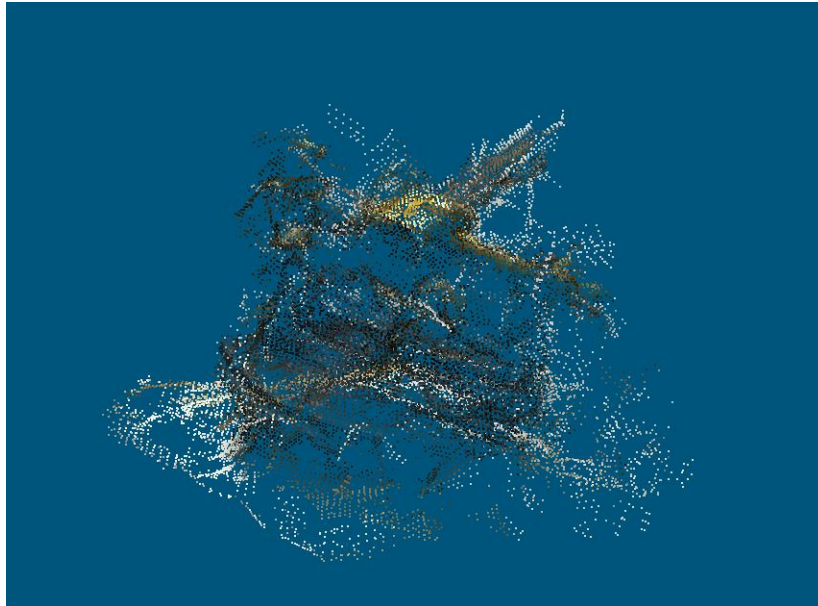


Figura 56 - Nuvem de dados do teodolito

A nuvem de pontos gerada era bastante densa (Figura 56). No entanto, dada a existência de muitos pormenores nos suportes e na zona inferior do teodolito, apesar de terem sido visualizadas algumas das *frames* auxiliando o processo de modelação da nuvem, a modelação do instrumento tornou-se uma tarefa difícil.

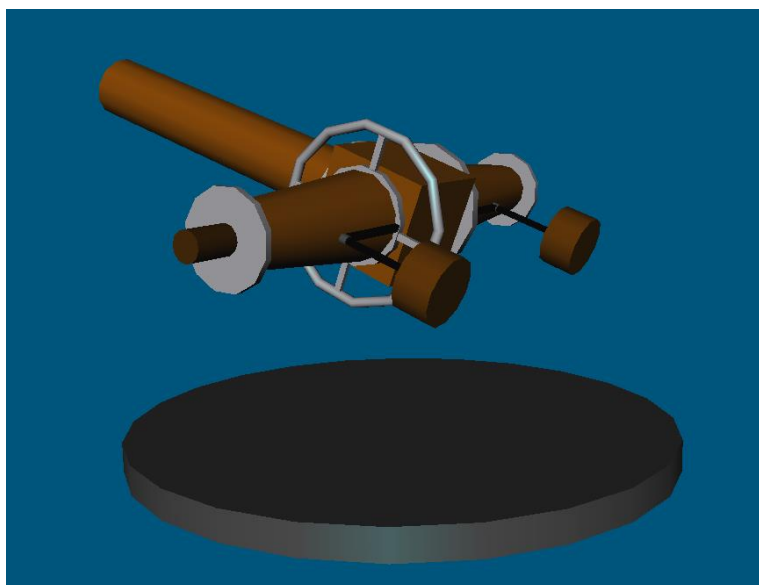


Figura 57 - Teodolito parcialmente modelado

Deste modo, foi possível modelar a parte superior do teodolito, zona mais facilmente distinguível na nuvem e que possuía menos pormenores (Figura 57). Quanto aos apoios laterais e aos pormenores na zona inferior do teodolito, verificou-se que seria impossível modelá-los corretamente devido à falta de perceção das formas desta zona dos instrumentos na nuvem, pelo que se tornou impossível a conclusão da modelação do teodolito.

4.4.2 Círculo Meridiano

O círculo meridiano é um instrumento que permite a determinação da ascensão reta e a declinação de corpos celestes. Outrora colocado e utilizado na sala da Meridiana, este instrumento assumia uma grande importância no ensino e na investigação realizada no Observatório Astronómico da Escola Politécnica.

De modo a conservar este importante instrumento, este foi armazenado nas instalações do Museu da Ciência da Universidade de Lisboa, protegido tanto quanto possível dos fatores de deterioração externos. Aquando da aquisição de dados, o círculo meridiano encontrava-se dentro de um caixote apropriado e dado o grande peso do instrumento foi impossível movê-lo para outra estrutura que permitisse uma aquisição de fotografias mais completa. Optou por se obter um grande volume de fotografias de todos os ângulos possíveis dado o difícil acesso ao instrumento. Neste caso, ao invés de se adquirirem imagens a partir de um vídeo, utilizaram-se fotografias isoladas. Ao todo, foram adquiridas 77 fotografias com uma resolução de 4608 x 3456 pixels das mais variadas perspetivas sendo, maioritariamente a partir de uma vista superior (Figura 58).



Figura 58 – Fotografia do círculo meridiano

O processamento das 77 fotografias foi feito mais uma vez com recurso ao *VisualSFM*, permitindo assim a obtenção de uma nuvem de pontos densa que permitisse a modelação do instrumento.



Figura 59 – Nuvem de pontos gerada depois do processamento das fotografias do círculo meridiano

Apesar de a nuvem de pontos possuir várias lacunas na zona inferior do círculo meridiano, a modelação foi possível, visto que o instrumento é constituído por vários sólidos de revolução e dada a densidade da nuvem na zona superior foi possível, portanto, produzir sólidos geométricos exatos a partir dos pontos disponíveis.

A modelação do círculo meridiano foi iniciada pela luneta principal através da criação de um cilindro, tendo sido posteriormente modelados os dois apoios, neste caso, duas rodas, através de superfícies cilíndricas duplas e paralelepípedos. Todos os outros pormenores do instrumento foram modelados utilizando cilindros de várias orientações e dimensões de modo a tornar o modelo 3D bastante similar a um círculo meridiano real.

Neste modelo foi aplicada a textura das fotografias obtidas anteriormente. Na versão final optou-se por não colocar texturas em algumas secções do objeto, pois em alguns casos a cor e o brilho das superfícies geométricas é mais apelativo e realista do que a própria textura fotográfica utilizada (Figura 60).

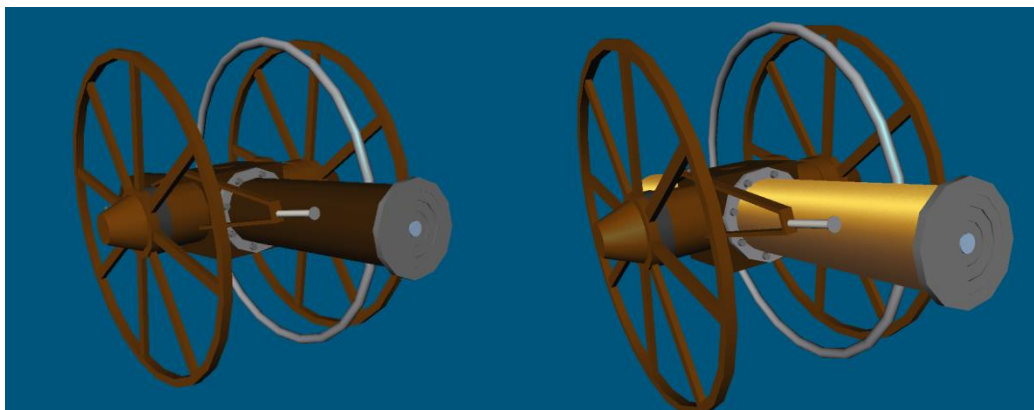


Figura 60 – Modelo 3D do círculo meridiano sem textura (à esq.) e com textura (à dir.)

5. Crítica aos *software* utilizados

5.1 Trimble Realworks

Este *software* destaca-se pelo facto de permitir o rápido processamento de grandes volumes de dados, permitindo a visualização e o manuseamento de nuvens de dados laser com milhões de pontos. A simplicidade é outra das grandes características relevantes deste programa, apesar de algumas operações envolvidas na sua utilização serem bastante complexas. A interface e a fácil visualização, bem como a edição dos dados tornam este *software* eficiente do ponto de vista do utilizador.

O *Trimble Realworks* revelou-se um *software* fundamental na execução deste projeto. Sendo esta aplicação especializada no tratamento de dados LiDAR, adequou-se a este projeto oferecendo uma visão simples e nítida das nuvens apesar do grande volume de dados processado, permitindo uma fácil e intuitiva segmentação de agrupamentos de pontos para posterior modelação ou eliminação. Na modelação, fator crucial neste processo, o *Realworks* oferece várias formas e sólidos que conjugados cobrem praticamente todas as formas possíveis. Outro ponto forte do *software* é a fácil edição de objetos modelados através de várias opções pré-definidas ou, em última instância, através da edição manual dos sólidos modelados.

Na criação e edição de *meshes*, verificou-se que o *software* possui várias ferramentas de grande utilidade neste projeto, quer na conversão de superfícies modeladas para *mesh* quer na criação de *mesh* diretamente através de pontos LiDAR.

A aplicação e edição da textura revelou-se o grande ponto fraco deste *software*. Apesar da aplicação de textura ser um processo simples, este pode ser bastante moroso quando os objetos são de dimensões reduzidas e com formas complexas. Se é um facto que estes objetos seriam problemáticos em qualquer *software*, aqui esse facto é agravado por não haver permissão para a edição da colocação de pontos homólogos depois de aplicada a textura. Quando esta é colocada erradamente, a correção da referência da textura fotográfica, obriga ao recomeço da operação.

5.2 VisualSFM

Uma das grandes vantagens do *VisualSFM* é a eficiente utilização dos principais recursos alocados pelo programa combinando a utilização da CPU com a GPU do computador. Este paralelismo resultou num tempo de processamento dos dados aceitável, apesar do elevado número de fotografias utilizado.

Este software, sendo ele de acesso livre possui alguma complexidade de operações. Começando pela sua instalação bastante complexa e com várias etapas, aquando da utilização do programa esta complexidade foi reduzida, automatizando ao máximo todos os procedimentos. Este facto foi bastante importante no processamento de grandes volumes de dados, sendo que esta vantagem também é uma desvantagem, pois ao automatizar os processos não é dada liberdade ao utilizador para editar qualquer parâmetro de execução do *software*. Outra grande vantagem deste *software*, é a reconstrução de objetos recorrendo apenas às fotografias, descartando a necessidade de introdução manual de todos os parâmetros das câmaras utilizadas na aquisição das fotos.

Após a utilização do *VisualSFM* neste projeto, verificou-se que o *software* obtém melhores resultados com um menor número de fotografias de grande resolução do que com um grande número de fotografias de baixa resolução. Este facto era espectável, mas a discrepância de resultados em cada um destes casos veio a revelar-se bastante significativa.

6. Análise de Resultados

Os resultados deste projeto podem ser analisados segundo dois prismas. Dado que a visualização deste modelo é dirigida não só à comunidade científica, mas também ao público em geral, este projeto assume uma importância estratégica, de forma a tentar sensibilizar a sociedade numa época em que a economia dificulta a cedência de verbas para o enriquecimento cultural do país. Os resultados deste projeto também devem ser analisados no que respeita à exatidão de todos os constituintes do modelo tridimensional, verificando-se o realismo e a qualidade da reconstrução de todas as infraestruturas modeladas (Figura 61).

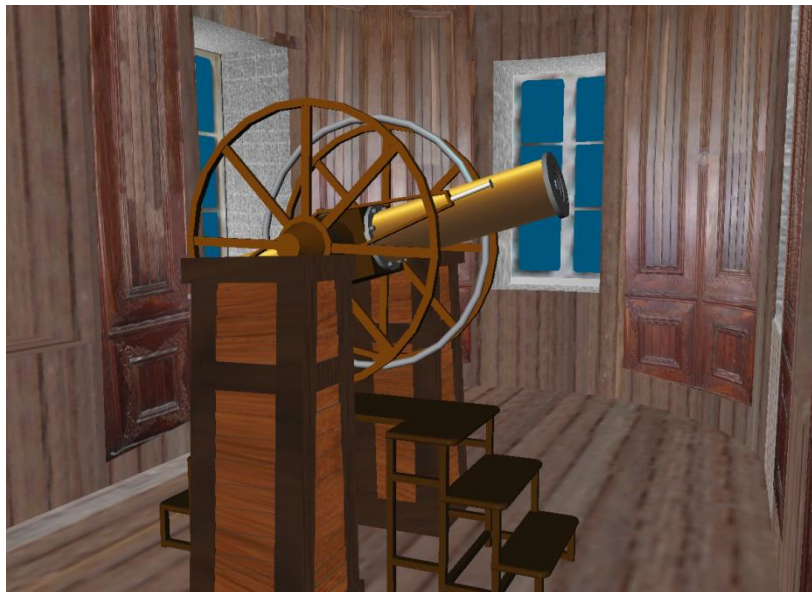


Figura 61 - Sala da Meridiana

A validação dos resultados finais foi feita analisando a qualidade de todas as superfícies geométricas criadas, comparando-as com a nuvem LiDAR original. Ao longo de todo o projeto, aquando da modelação de superfícies a partir de um conjunto de pontos LiDAR, não foi imposto um valor máximo de desvio padrão entre as distâncias dos conjuntos de pontos e a superfície modelada. Apesar disso, em todos os objetos tentou-se minimizar este parâmetro. Como era de esperar, analisando individualmente a exatidão de todos os objetos modelados, denota-se uma grande discrepância de valores entre aqueles que foram modelados a partir de uma seleção de pontos mais densa ou com pontos igualmente distribuídos ao longo de toda a zona do objeto e as superfícies geométricas criadas a partir de seleções de pontos onde não havia a cobertura total do objeto por parte da nuvem de pontos LiDAR. Nesta análise, apenas podem ser contabilizadas as superfícies geométricas que foram modeladas a partir de pontos da nuvem. Porém, apesar das superfícies tóricas e as superfícies cilíndricas duplas não serem diretamente modeladas a partir da nuvem, estas foram contabilizadas utilizando como superfície para análise do desvio padrão o cilindro provisório, visto que os parâmetros

(posição, orientação e fator de escala) são iguais num dado cilindro provisório e na superfície dele resultante.

Tabela 4 – Desvio padrão das superfícies modeladas

Tipo de objeto	Desvio padrão (centímetros)	
	Médio	Máximo
Parede exterior (plano)	0.4	0.9
Parede exterior (curvo)	0.5	1
Rodapé (plano)	0.3	0.6
Rodapé (curvo)	0.4	0.7
Pilar	0.1	0.2
Janela (plana)	0.4	1
Janela (curva)	0.6	1.1
Porta	0.5	2.8
Degraus	0.1	0.2
Bordo superior (plano)	0.2	0.5
Bordo superior (curvo)	0.3	0.6
Cúpulas	1.9	4.8
Varanda	0.1	0.2
Tubo de escoamento de água	0.5	0.6
Paredes interior (plana)	0.1	0.2
Paredes interior (curva)	0.2	0.3
Suporte do círculo meridiano	0.1	0.4
Círculo meridiano	0.2	0.7

Nas superfícies em que os pontos selecionados abrangiam todo o objeto, o desvio padrão é menor rondando, em média, 0.4 centímetros, enquanto que o desvio padrão máximo foi de 4.8 centímetros, obtido nas cúpulas, onde os objetos foram modelados usando poucos pontos da nuvem LiDAR e foram tidas em conta propriedades geométricas relativamente a outros objetos cuja modelação havia sido mais exata. Dado o elevado valor máximo do desvio padrão, pode-se extrapolar que os pontos utilizados na modelação das cúpulas não só eram poucos, como alguns deles eram ruído, provavelmente devido ao arvoredo circundante ao observatório.

Para além do estudo dos resultados, através da análise do desvio padrão, podem-se tecer algumas considerações baseadas na análise do modelo tridimensional obtido. Quanto à integração de todos os objetos num só modelo, denotam-se alguns problemas nas zonas em que dois cilindros com orientações diferentes se intersejam. Foi necessária a utilização de um terceiro objeto (superfície tórica) de modo a garantir uma interseção suave. Apesar da metodologia metódica na criação e na colocação da superfície tórica, existem sempre incoerências nestas situações.

Outra imprecisão que se pode verificar é o facto de que, aquando da conversão para *mesh*, a forma dos objetos sofre ligeiras alterações nos seus limites. Na maior parte dos casos, esta particularidade não é problemática, mas nas zonas onde existem planos que se intersejam é criada uma pequena zona na interseção. Esta zona é quase indistinguível na visualização genérica, sendo visível apenas quando estas zonas são observadas de muito perto.

No que concerne aos instrumentos modelados recorrendo à estrutura a partir do movimento (SFM), o modelo do teodolito ficou incompleto, já que a nuvem de dados revelou ser insuficiente para permitir uma modelação detalhada. Isto deveu-se ao facto das fotografias utilizadas na aquisição de dados terem uma resolução relativamente baixa, visto que foram extraídas de um vídeo de baixa resolução. Seriam necessárias mais fotografias com especial incidência nos suportes laterais do teodolito de modo a ser possível a modelação destas duas secções do instrumento. Na tentativa de modelação do teodolito, os outros constituintes foram de difícil modelação, dado que a nuvem de pontos continha muito ruído, o qual advinha do facto do instrumento estar armazenado junto de uma parede da sala onde se encontram armazenados todos os instrumentos. Assim, após o processamento das fotografias usando o *VisualSFM* aproximadamente 40% dos pontos da nuvem pertenciam à parede tornando a limpeza da nuvem bastante morosa.

No cômputo geral, verifica-se que os dados adquiridos foram insuficientes para a reconstrução do teodolito, sendo que para o sucesso desta tarefa seriam necessárias mais fotografias do instrumento e/ou fotografias de maior resolução.

Outro instrumento modelado por SFM foi o círculo meridiano. Neste caso, a aquisição de dados foi dificultada pelo facto do instrumento estar armazenado num caixote, obrigando à aquisição de fotografias maioritariamente a partir de uma vista superior. As fotografias de alta resolução (4608 x 3456 pixels) permitiram bons resultados, originando uma nuvem de pontos densa que possibilitou a modelação integral de todos os pormenores do instrumento.

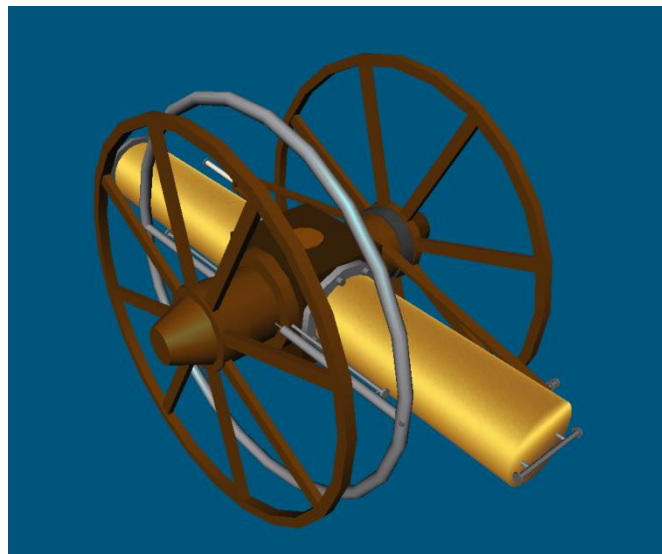


Figura 62 - Círculo meridiano com textura fotográfica

Analisando o modelo final, denota-se alguma falta de brilho e simplicidade na profundidade da cor de todos os pormenores. Isto deveu-se à aplicação de texturas não ter sido feita utilizando as fotografias adquiridas do objeto, dado que este já possui alguns danos superficiais. Optou-se por utilizar texturas genéricas, em alguns constituintes do modelo do círculo meridiano.

7. Conclusão

A elevada densidade dos dados fornecidos pela tecnologia LiDAR, característica única face a outras tecnologias, obriga a uma grande capacidade computacional, principalmente em projetos de grande dimensão. O LiDAR terrestre apresenta-se como a técnica que melhor cobre pormenores na aquisição de dados para reconstituição de edifícios históricos dada a possibilidade de proximidade entre sensor e superfície a reconstituir. Para além da proximidade entre sensor e superfície, o LiDAR terrestre oferece outra vantagem comum a todos os sistemas LiDAR que incide na rapidez de aquisição de dados, sendo esta independente de condições de luminosidade ou outros fatores climáticos. Porém, no caso de edifícios com telhados ornamentados e com vários objetos de interesse, esta técnica, quando utilizada individualmente ou apenas a partir do solo, pode não recolher dados suficientes de todas as estruturas pretendidas.

Neste projeto, essa falta de informação no terraço do observatório foi compensada com a visualização da cobertura fotográfica feita ao edifício conjuntamente com os pontos disponíveis. Houve, porém, um decréscimo de precisão das superfícies geométricas geradas nestas zonas. Nas restantes estruturas do observatório, foi feita uma modelação pormenorizada, sendo os dados bastante explícitos e precisos apesar de toda a flora que rodeia o observatório. Esta modelação recorreu a metodologias que tentassem reproduzir o edifício de modo a recriá-lo o mais próximo possível do edifício original, tendo sido dada grande importância à estética do modelo tridimensional. A modelação de um dos instrumentos falhou, tendo sido impossibilitada pela falta de clareza da nuvem de dados. Verificou-se que, na reconstrução tridimensional através da estrutura a partir do movimento é necessário um grande número de fotografias, devendo ser este número aumentado no caso de existirem pequenas saliências e pormenores no objeto. Esta técnica funciona melhor com fotografias de resolução alta, obtendo-se bons resultados mesmo quando estas não são adquiridas em todas as perspetivas do objeto, como foi o caso da aquisição de dados do círculo meridiano.

Uma etapa que pode ser adicionada a este projeto no futuro é a cobertura fotográfica das cúpulas do observatório, especialmente a cúpula central, através de uma câmara fotográfica acoplada a um dispositivo aéreo não tripulável (DANT), de modo a permitir a obtenção de fotografias contendo toda a zona superior do observatório. No entanto, todas estas etapas requerem aquisição de dados no observatório, que como referido anteriormente, se encontra atualmente inacessível, dificultando a execução de qualquer aquisição adicional de dados que seja ela do exterior ou do interior do edifício.

Outra etapa para o futuro é a integração deste modelo numa página web de divulgação do observatório, conjuntamente com outras informações históricas de modo a, como já foi referido anteriormente, aumentar a visibilidade do observatório e assim tentar sensibilizar a sociedade permitindo, quem sabe, a aquisição de verbas para a recuperação estrutural deste edifício de interesse histórico, que resultaria num nobre fim para este projeto, justificando todo o trabalho envolvido.

8. Referências

- Agarwal S., N. Snavely, S. M. Seitz and R. Szeliski, (2010), "Bundle Adjustment in the Large". *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Vol. 6312, pp. 29-42.
- Falcão I. (2012), "Extracção semi-automática tridimensional dos principais elementos de um perfil rodoviário a partir de dados LiDAR", *Tese de Mestrado*. Universidade de Lisboa
- California Department of Transportation (2011), "Terrestrial Laser Scanning Specifications", California. Disponível em http://www.dot.ca.gov/hq/row/landsurveys/SurveysManual/Manual_TOC.html. Acedido a 4 de Agosto de 2013.
- Gil F. B., M. G. S. Canelhas, (1987) *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa: passado/presente, perspectivas futuras*, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Kanade T., D.D. Moris (1997) "Factorization methods for structure from motion", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 356, Nº 1740, 1998, pp.1153-1173.
- Lowe, D.G., (2004) "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints". *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, pp. 91-110.
- Museu Natural de História Natural e da Ciência, (2010) "Observatório Astronómico da Escola Politécnica", Museu Natural de História Natural e da Ciência http://www.mnhnc.ul.pt/portal/page?_pageid=418,1592463&_dad=portal&_schema=PORTAL Acedido a 2 de Setembro de 2013.
- Vale T., C. Gomes, A. Pascoal, C. Teixeira (2011) "Observatório Astronómico da Faculdade de Ciências", Lisboa. Disponível em http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=4812. Acedido em 15 de Julho de 2013.
- Paulu, (2011) "Observatório Astronómico da Escola Politécnica", Lisboa. Disponível em <http://sacodasfotos.blogspot.pt/2011/08/observatorio-astronomico-da-escola.html>. Acedido a 27 de Agosto de 2013.
- Ramalho, A., (1882) "Estabelecimentos Científicos de Portugal". *Ocidente*, Vol. 5, Nº 118, p. 73.
- Shum, H., Q. Ke and Z. Zhang, (1999) "Efficient bundle adjustment with virtual key frames: a hierarchical approach to multi-frame structure from motion". *Computer Vision and Pattern Recognition*, Fort Collins, CO.
- Wu, C., S. Agarwal, B. Curless and S. M. Seitz, (2011) "Multicore bundle adjustment". *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Providence, RI, pp. 3057-3064.

9. Anexos



Figura 63 - Fotografia utilizada na modelação das portas de acesso à cúpula central 1



Figura 64 - Fotografia utilizada na modelação das portas de acesso à cúpula central 2



Figura 65 - Modelo 3D com enfoque na zona superior do observatório

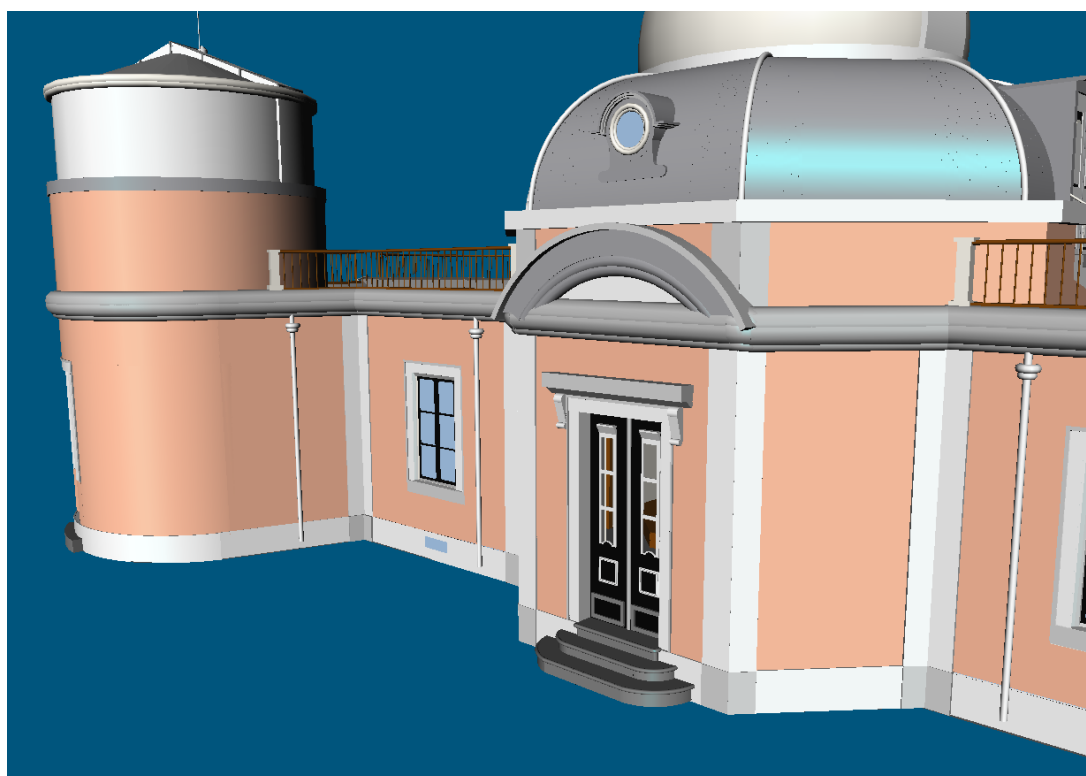


Figura 66 - Modelo 3D com enfoque na fachada frontal do observatório



Figura 67 - Porta de acesso à sala da Meridiana

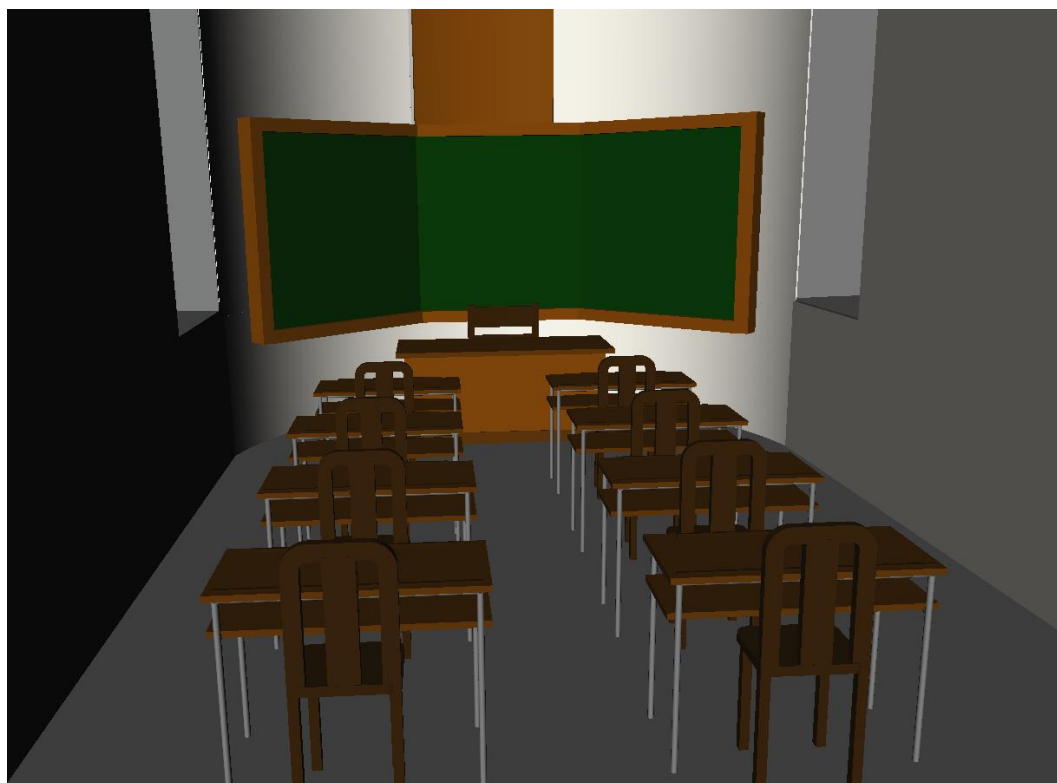


Figura 68 - Sala de aula (sem textura)

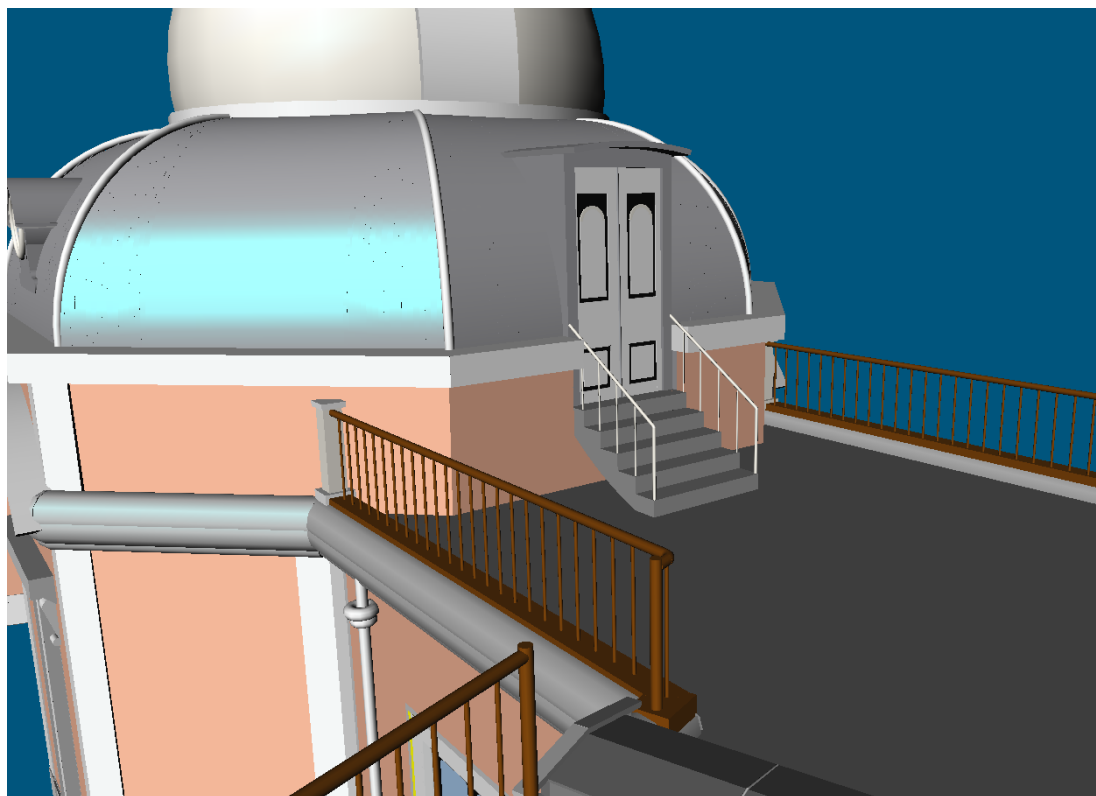


Figura 69 - Porta de acesso à cúpula central



Figura 70 - Sala da Meridiana (perspetiva exterior)

Abaixo, apresenta-se o *paper*, aceite na *Digital Heritage International Congress 2013*, tendo este, a contribuição do modelo 3D obtido neste Trabalho de Projeto.

The Teaching Astronomical Observatory of the University of Lisbon (19th century)

A Virtual Experience

Ana Paula Cláudio^{1,3}, Paula Redweik^{2,4}, Maria Beatriz Carmo^{1,3}, Marta Lourenço^{5,6}, Pedro Lopes², António P. Matos⁶, Ana Margarida Campos¹, Jorge Santos², José Pedrosa¹, Robin Burgess¹, José Juan Blasco⁷, Fernando Sempere⁷

¹Department of Informatics, ²Department of Geographic Engineering, Geophysics and Energy

³LabMAG, ⁴CeGUL/IDL

Faculty of Sciences- University of Lisbon

⁵Interuniversity Research Unit for the History of Science and Technology- University of Lisbon

⁶Museums of the University of Lisbon

⁷Departamento de Expresión Gráfica- Universidad de Extremadura

apc@di.fc.ul.pt, pmredweik@fc.ul.pt, bc@di.fc.ul.pt, mclourenco@museus.ul.pt,
fc37315@alunos.fc.ul.pt, apmatos@museus.ul.pt, {fc35034, fc40864, fc37417,
fc36815}@alunos.fc.ul.pt, jjblasco@unex.es, ferbesel@gmail.com

Abstract—The last teaching observatory of historical interest in Portugal, from the late 19th century, is one of the most charismatic buildings of the Museums of the University of Lisbon. After 100 years of intense use, the Observatory needs structural restoration before it can be fully returned to public fruition. Recently, a group of students from this University was engaged in the construction of virtual 3D models to recreate the Observatory building and collections. This paper describes the models constructed as a tool to be used for information dissemination among broader audiences.

Index Terms— Scientific Heritage, 3D Models, Multi-View Photogrammetry, Terrestrial Laser-Scanning, 3D Modeling and Animation Software

INTRODUCTION

The Astronomical Observatory of the Lisbon Polytechnic School is the last teaching observatory of historical interest in Portugal. Created in 1898, it survives intact in its original design, together with a collection of c. 200 scientific instruments, a small archive and a collection of astronomical books. Given its singularity in the context of scientific heritage, the quality and beauty of its architecture, as well as its privileged location in the Botanical Garden, the Observatory has the potential to become the Museum's focal point for the promotion of astronomy and its history.

After 100 years of intense use, however, the Observatory is highly degraded and needs

structural restoration before it can be fully returned to public fruition. Recently, three professors of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon decided to involve a group of students in the construction of virtual 3D models to recreate the Observatory building and collections.

Two methods were used to produce the models: construction based on data acquired by photogrammetry or laser-scanning and construction of the models from scratch, using 3D modeling and animation software.

In the first method three different approaches were applied: interactive and automatic multi view photogrammetry, based on photographic information and video frames, and Terrestrial Laser-Scanning.

To produce the model of the observatory from scratch, the students used a popular software tool for creating 3D animated models and for video games. To guide them in the modeling process, some orthographic projections of the astronomical observatory, previously designed by an architect, were provided.

In both techniques, after embellishing the model with lighting and textures, the students created short animations of virtual tours around the building and inside its interior. Moreover, they also produced an interactive and navigable model with features such as triggered events (e.g., switch on/off the lights, open/close doors) and camera sweeps. The user can freely

command his/her navigation experience inside the virtual model.

Besides producing their evaluation assessments, the students have gained contact with an historical building of their own University. They have also produced a tool that can be used for information dissemination among broader audiences, for public programs, as well as for raising funds for the Observatory restoration.

This document is organized as follows: section II summarizes the history of the Observatory; section III presents the models and describes the approaches used to produce them; and finally some conclusions are drawn in section IV.

HISTORY OF THE OBSERVATORY

Astronomical Observatories for the teaching of astronomy and mathematics were common in 19th and early 20th century higher education institutions across Europe 00. Typically constructed in gardens or small elevations, many university observatories were located in city centres. Their structural design was generally simpler and leaner than national or research-oriented observatories. Important examples that still exist today are the astronomical observatories of the universities of Utrecht, Strasbourg, Toulouse and Tartu. In early 20th century Portugal, there were three teaching astronomical observatories: one at the University of Lisbon – the Astronomical Observatory of the Lisbon Polytechnic School – and two others at the Universities of Porto and Coimbra. Of these, only the one in Lisbon survives in their original architectural design. Today, it is part of the National Museum of Natural History and Science of the University of Lisbon.

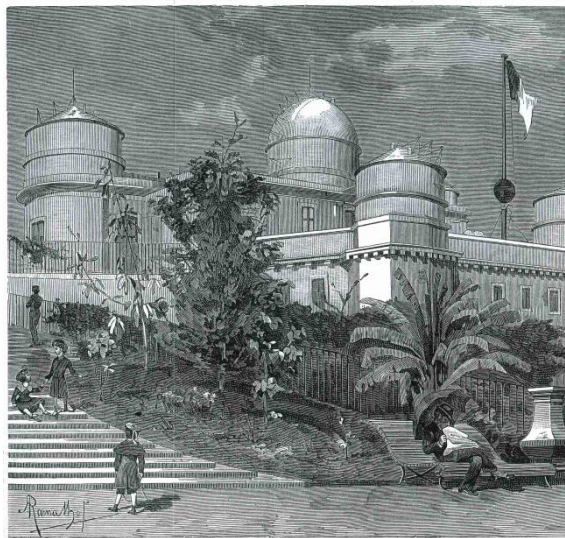


Fig. 1. Engraving depicting the Observatory, 1882 (magazine *Occidente*, April, Lisbon).

What we designate by the ‘Astronomical Observatory’ actually consists of three buildings: i) the main observation building, with three domes and a meridian-room; ii) a three-storey building where several classrooms, the library and the teachers’ offices were located (these two buildings, illustrated in Fig. 1, are connected through an underground tunnel); and iii) a small wooden building supposedly used for instrument calibration 0. It was constructed in the Botanical Garden, in 1898, according to the plans of Victor Augusto Gomes da Encarnação and José Cecílio da Costa 000.

In 1911, when the University of Lisbon was created, the Polytechnic School’s facilities, equipment, students and professors were integrated in the Faculty of Sciences. The Astronomical Observatory remained in use and equipment continued to be acquired for the next 80 years. Teaching covered Astronomy, Mathematics, Geographical Engineering, Topography, among others. The teaching activities were discontinued in the late 1990s, when the Observatory became part of the Museum. Together with a collection of c. 200 19th and 20th century instruments and a small archive and library, the Observatory silently awaits a long-deserved requalification. It will become the Museum’s focal point for the promotion of astronomy among diverse audiences. The integral character of its heritage – building, instruments and archives – gives it also a special role as a source for research and post-graduate teaching into the history of science and scientific heritage in Portugal.

3D virtual models

Web pages containing photographs, text and links to other pages are nowadays the most common approach to presenting interesting historical sites and museum collections. Panoramic photographs, like those based on QuickTime VR 0 are frequently used, offering a 360° view of the space around a fixed location, giving a sense of immersion. This sensation is further extended by immersive photographs that support the possibility of viewing also 180° in the up and down directions. To visit the space, the user selects pre-defined observation points 00.

However, when the buildings and/or artifacts are severely damaged, or even destroyed by natural causes or as result of wars, 3D virtual models are the best vehicle to visualize their former appearance. Some of these virtual models even support real-time interactivity allowing user navigation inside it, a feature not supported by panoramic or immersive photographs with pre-defined observation points. Yet, to maintain

this real-time interactivity, a photorealistic quality is seldom achieved.

There are several examples of virtual reconstructions of archaeological sites or historical buildings that are not accessible for public fruition, due to conservation issues, space constraints or temporary unavailability. As for the Astronomical Observatory it is currently inaccessible, completely covered by protective material. Nevertheless it was still possible to collect data in loco just before the scaffolding was mounted.

In the next paragraphs a few examples are referred to illustrate different techniques that can be used to build 3D geometric models.

Image-based modeling and range-based modeling originate models from a real object or environment as it is. Although requiring more expensive equipment, in range-based modeling the 3D coordinates of the objects' surfaces are provided directly from active sensors, while in image-based modeling further processing is required to obtain the 3D coordinates from images. Often none of these two techniques alone can fully satisfy the requirements of large environments for applications in the domain of cultural heritage. Laser scanning can provide all the details, but for large buildings it produces a huge and unmanageable number of 3D points even for flat surfaces. On the other hand, image-based modeling is less efficient for irregular or sculpted surfaces. Therefore, multiple techniques can be combined to produce high detailed 3D reconstruction. That is the case of the virtual reconstruction of the Abbey of Pomposa, near Ferrara, Italy: image-based techniques were used to capture the basic shapes and then the detailed elements, obtained by laser scanning, were added to the global model that was previously created from images.

Visintini et al. describe the use of a photogrammetric Terrestrial Laser Scanning (TLS) to obtain a photorealistic 3D model of the Church of Saint Anthony Abbot in San Danieli del Friuli, north-eastern Italy, both inside the church and outside for the main gothic facade.

Callet et al. refer the use of data acquisition with 3D laser scanning technology to build the virtual model of the cathedral of Notre-Dame de Paris, France. More detailed areas, such as the three portals, the Kings Gallery and the Virgin Railings, were acquired with two spatial resolutions, both of them more accurate than the resolution used in the rest of the monument.

As mentioned before, range-based techniques can acquire very detailed surfaces which make them suitable to build 3D models of small objects of art, such as jewelry, ornaments, decorated weapons or statues. This is the case of the work presented by Przybilla and Peipe that

describes the range-based techniques and equipment used to model several objects, like crosses, swords, crowns or statues belonging to the treasure of the Essen cathedral, Germany.

3D modeling tools, like CAD software, are an option to build 3D models based on drawings, on blueprints and/or on site measurements. When the original object no longer exists this is actually the only solution. In this case, paintings, photos and text documents are valuable sources of information to complement on-site measurements. The resulting model is often low on details, not providing a realistic appearance, but it can be improved applying texture mapping. Some examples of models built with 3D modeling tools are: an art gallery in Azores which was built with Autodesk AutoCAD; the Monastic complex of St. Andrew, in Norwich, United Kingdom that was modeled with 3DS Max; and the Mosque of Córdoba, in Spain, the Panagia Angeloktisti, a Byzantine church located in Cyprus, and the ancient Egyptian temple of Kalabsha, all of them modeled with Maya.

The models of the Astronomical Observatory described in the next two subsections were produced by two groups of students from the Faculty of Sciences of the University of Lisbon with distinct backgrounds. While the first subsection describes the techniques applied by the group composed of Geographic Engineering students, the second one focuses on the approaches used by Informatics Engineering students. The two groups pursued distinct ways and goals during the learning process while modeling the object.

Using Terrestrial Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning to model the Observatory

Two approaches were chosen for modelling the building as it is: terrestrial photogrammetry and terrestrial laser scanning. To enrich the building's model interior with some assets of the repository, a SFM (Structure From Motion) technique was used which can be included in the terrestrial photogrammetry technique but will be handled separately.

Modelling by terrestrial photogrammetry

The building's architecture is very adequate for pedagogical objectives since it is isolated, its dimensions allow the model to be achieved during one semester and it contains elements that have to be modelled resorting to several different tools, allowing students to explore the modelling abilities of the used software. The ground floor has a set of plane and curved facades and the upper floor contains three observation domes.

Doors aggregate some architectural details and small stairs.

The front side was totally accessible, but the access to the sides and the rear was disturbed by dense and high vegetation. Due to the degraded state of the interior stairs it was not allowed to reach the terrace on the first floor, so that all photos had to be made from the ground.

A set of convergent photos was taken all around the building from (not very) different heights using a ladder. A calibrated Canon EOS 600D camera with a focal length of 18mm (manual focus maintained in a fixed position) was used in the photographic survey. The calibration of the camera was previously done with the software Photomodeler Scanner from EOS systems [22], which was also used in the modelling task.

The modelling consisted in, as usual in interactive multi view photogrammetry, determining the relative orientation of all needed photos by measuring a set of common points in each triple. In view of the objective for the final model and because the set of photos wasn't disconnected there was no need to use ground control at this stage. The final model could always be absolutely oriented later. Afterwards 3D points (referred to an intern coordinate system), straight and curved lines were captured with the specific aim of defining the surfaces of the facades. These were then defined by planes or by curved surfaces limited by the measured lines. Details with little depth that could be well defined by their image within the texture, such as window glasses, were not individually measured (Fig. 2).

The cornice of the ground floor, which has a continuous development along the building, had to be portioned in straight and curved sections. The three observation domes could be modelled as revolution solids, as well as the two street lamps in front of the principal entrance. Doors and stairs were modelled in detail, as they present depth and characterize the facades they belong to (Fig. 3).

Textures were assigned to the surfaces by rectification of the most adequate photographs from the set, those which angle between photographic axis and surface approached perpendicularity (Fig. 4).

Since the original photos captured the building as it is, showing stains in the walls and vegetation in the rear side, it was decided to virtually repair the walls by removing most of the vegetation and of the unpleasant moisture spots replacing them with neat texture. Since it is easier to find homologous points needed for orientation in stained walls than in clean ones, this operation was done after completion of the geometric model and affected only the photos

that were being used for texture assigning purposes (Fig. 5).



Fig. 2. Example of modelled facades.



Fig. 3. Examples of modelled objects: street lamp (upper left), door (upper right), domes (bottom).



Fig. 4. View of the front façade from the complete 3D photogrammetric model

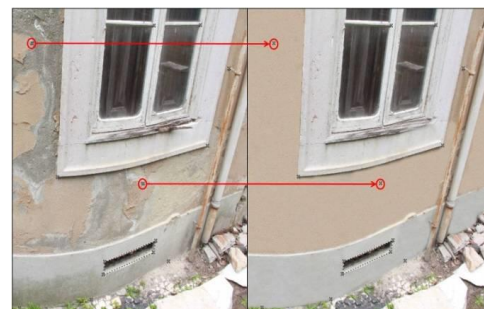


Fig. 5. Virtual repair of wall textures



Fig. 6. 3D Model integrated in a virtual scenario.

The photogrammetric 3D model of the observatory was then imported to an animation program where a scenario was created and a short virtual visit to the outside of the building was simulated (Fig. 6).

Modelling by terrestrial laser scanning

Taking advantage of collaboration within the scope of an Erasmus program, it was possible to make a complete survey of the observatory building and of one accessible interior room using a photogrammetric laser scanner Leica C10 0 from the University of Extremadura (Spain).

This experience was very interesting for the students allowing them to get acquainted with another technique for architectural objects surveying and to compare the modelling work based on either technique.

Four scans were needed to cover the exterior of the building and one for the meridian-room, the most emblematic room of the observatory, which walls are covered with exotic wood panels that have resisted the weathering of the building. Four targets were positioned around the object in a way that each pair of scans would capture two of them in order to allow a later concatenation of the generated point clouds. The interior scan was connected to the exterior ones by scanning two targets which were lying outside and were captured through an open window in the room. The used targets had been already scanned outside and stayed still.

Since there was a camera linked to the scanner, with internal and mounting calibration, it was possible to make a photographic survey in each scanner station. The photographic information was used in post processing in order to assign the real colour to each point of the cloud. The textures for the surfaces came mainly from the photogrammetric survey, since they had better perspectives from the facades.

The scanner stations, just like the camera stations in the photogrammetric survey, were

situated on the ground on a tripod. Therefore, although the final point cloud is very dense, consisting in a very rich geometric information source about the building, one can't consider it a full 3D model, since on one side it has gaps caused by occlusions and, on the other side, walls are transparent due to lack of surfaces. So, there is still a lot of work to do till one has a 3D model (Fig. 7 and Fig. 8).

For the modelling task the Trimble Realworks software 0 was used. Instead of defining points and lines as boundaries for surfaces, every single object was modelled from the subset of cloud points defining it. Planes and curved surfaces were adjusted to the point sets on the walls. Thin cylinders were adjusted to the points of the rail along the cornice in the upper terrace. Other revolution solids were adjusted to the points in the domes eliminating gaps caused by occlusions. As a result, a 3D model rich on detail and with reliable geometry was achieved (Fig. 9).

Textures could be assigned to the geometric features in order to get a more realistic appearance (Fig. 10).

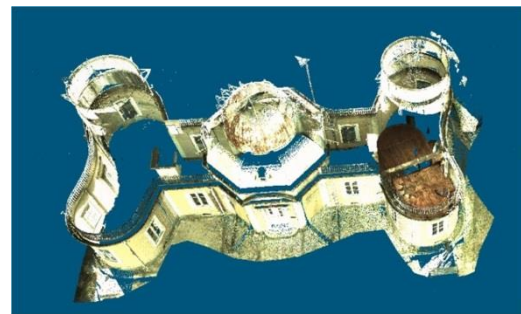


Fig. 7. Complete point cloud: view from above showing the gaps.



Fig. 8. Complete point cloud :view from the ground.

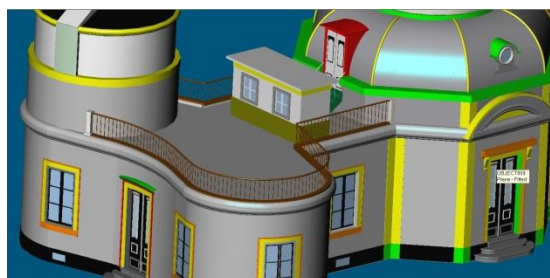


Fig. 9. 3D model based on laser point clouds.



Fig. 10. Textured 3D model.

Modelling by automatic multiview photogrammetry

The most relevant room is the already mentioned meridian-room with wooden walls, ceiling and ground and a slot on the ceiling along the meridian that could be opened to determine the longitude or the local time by observing the stars transit with an instrument called meridian circle mounted in the center of the room over two stanchions. A laser point cloud has been used for modelling the walls, ceiling, ground and stanchions (Fig. 11). The meridian circle, however, was not on place anymore since it had been removed for a storage room, like every other movable asset.

Since it was important to include some assets in the virtual reconstruction of the building's interior, a visit to the storage room was undertaken and the more characteristic instruments were captured on video.



Fig. 11. Laser point cloud of the meridian-room.



Fig. 12. Point cloud of a theodolite obtained with VisualSFM.



Fig. 13. The meridian circle inside the meridian-room.

The video frames were used to produce point clouds from images with the open source software VisualSFM 0 (Fig. 12). The modelling of the instruments was done in Trimble Realworks. Finally the meridian circle could take its old place again in the centre of the meridian-room (Fig. 13).

Using 3D modeling and animation software to model the Observatory

To produce the model of the Observatory from scratch, the students have used Blender 0, a public 3D modelling and animation tool, and afterwards X3D 0, a free open standard file format to represent 3D interactive scenes.

Blender is a free and open-source software tool that supports, among other functionalities, the creation of 3D models, the insertion of lights, the application of textures, and the production of animations using a virtual camera that moves inside the space. As a starting point the students were given a set of 2D blueprints that they inserted as a background picture in the 3D viewport editing window of Blender's interface to guide them in the construction of the model. By the time of the execution of this modeling phase, there was no accurate information available about the decoration of the interior of the building, so the students were told to freely choose colours and textures to cover the floor,

the stairs, and other surfaces in the model. These colours and textures can be easily replaced.

After embellishing the model with lighting and textures, the students created a short animation leading the camera to explore the exterior and the interior of the virtual building.

Learning to use Blender can be a slow and somehow heavy process at start, but becomes significantly easier and faster after experiencing its main functionalities following step-by-step a set of available tutorials in the Web. As a matter of fact, Blender is a very popular tool with a large group of users, some of them quite generous and willing to share expertise, like for instance [28] and 0.

Fig. 14 illustrates the exterior of a Blender model of the Observatory, while Fig. 15 is a snapshot of an animation where the front door is opening and Fig. 16 shows a detail inside the building, the stairs that lead to a dome and a window overlooking the exterior.



Fig. 14. Detail of a Blender model of the exterior of the Astronomical Observatory: the front facade with two lamps.



Fig. 15. Detail of a Blender model of the exterior of the Astronomical Observatory: the front door is opening.

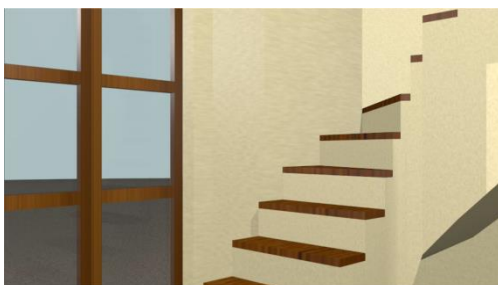


Fig. 16. Detail of a Blender model of the interior of the Astronomical Observatory: the stairs that lead to a dome and a window overlooking the exterior.

Having completed the Blender model, the students exported the model as an X3D (Extensible 3D) file which they edited using a common text editor or a specific X3D editor and visualizer. They were asked to apply specific graphic features available in X3D and to add lights, textures, interactive features such as buttons and proximity-triggered events, animations and camera sweeps.

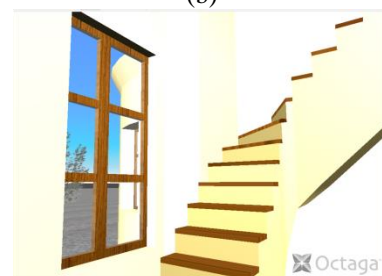
X3D scenes support real-time user interaction in a standalone specific viewer or in a Web browser with a X3D plugin. An extensive list of X3D supporting applications can be found in the Web3D site [1]. One of the possibilities is Octaga Player [2] which was used to produce the snapshots of Fig. 17 that illustrates several snapshots obtained during an interactive navigation path in a X3D model. The facade of the building exhibits two colorful buttons that the user clicks to switch the lights on/off and to open the door.



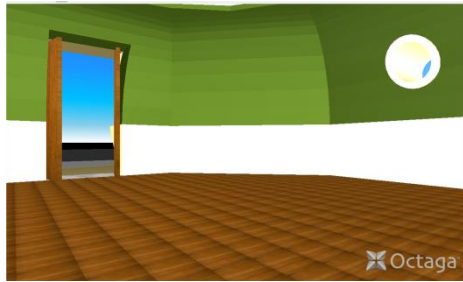
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 17. Snapshots of a X3D model of the Astronomical Observatory obtained during an interactive real-time visit: (a) exterior of the building; (b) opening the front door; (c) detail of the interior overlooking the exterior through a window; (d) interior detail inside one of the domes.

Conclusions

The Astronomical Observatory was the headquarters of the Geographic Engineering in the Faculty of Sciences. Since 1921 and till the relocation to the current facilities in 2000, most technical matters were taught in the classrooms of the building, in the observation domes and in the surrounding gardens. All the present teaching staff of this scientific area has memories of sitting for some semesters on its benches, surveying the gardens and of spending some nights in the domes observing the stars for latitude and azimuth determination. The present Geographic Engineering students do not have such a link anymore.

The initiative of involving the students had two main positive aspects. First, the dissemination process: most of the students involved in this challenge of virtually recovering this building didn't even know about the existence of this astronomical observatory in their own University. Nevertheless, they were all very enthusiastic by the proposal and now they are showing the models in their (digital and non-digital) social networks, reaching broader audiences. Second, while being evaluated in their courses, the students produced a tool that can be used, among other objectives, for fund raising for the Observatory restoration. Some of the produced materials can be visualized in a webpage [3].

Indeed, comparing to some of the models presented in this paper, there are more perfect and accurate 3D models of historical buildings worldwide. However, it should be emphasized that most of those projects were considerably expensive while the here presented were enthusiastically developed without a budget.

All the followed approaches were successful. The experience was so fruitful and rewarding that it is intended to pursue similar challenges in the near future.

References

- E. Baiada, F. Bonoli and A. Braccesi, Museo della Specola, Bologna University Press; 1995.
- M. C. Lourenço, "Between two worlds: The distinct nature and contemporary significance of university museums and collections in Europe", PhD dissertation 2005, Conservatoire National des Arts et Métiers (Paris) (accessible online at <http://webpages.fc.ul.pt/~mclourenco/>).
- V. R. Silva, "L'Observatoire Astronomique de l'École Polytechnique", In M.A.A.M. Ferreira & J.F. Rodrigues (eds). Museums of Science and Technology, pp. 125-30, MCUL/Fundação Oriente, Lisboa, 1998.
- E. Andrea, A Escola Politécnica de Lisboa: A 4ª Cadeira e os seus professores, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1937.
- L. M. Carolino, "O Observatório Astronómico da Escola Politécnica de Lisboa: 1875-1911", In: M.C. Lourenço & M.J. Neto (eds), Património da Universidade de Lisboa: Ciência & Arte, pp. 107-120. Universidade de Lisboa/Tinta da China, 2011.
- V. Rivotti and A. Sepúlveda, Astronomia e Engenharia Geográfica na Escola Politécnica e na Faculdade de Ciências. In F.B. Gil & M.G.S. Canelhas (eds), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Passado, Presente, Perspectivas Futuras, pp. 179-185. FCUL, Lisboa, 1987.
- S. E. Chen, "QuickTime VR – An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation", Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1995, pp 29-38.
- Louvre Museum, Paris: <http://www.louvre.fr/>
- NGA, National Gallery of Art, Washington: <http://www.nga.gov/>
- F. Remondino and S. El-Hakim, "Image-Based 3D Modelling: A Review", The Photogrammetric Record 21(115), pp 269–291, 2006.
- S. El-Hakim, J.-A. Beraldin, M. Picard and G. Godin, "Detailed 3D Reconstruction of Large-Scale Heritage Sites with Integrated Techniques", IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 24(3), pp 21-29, 2004.
- D. Visintini, E. Siotto and E. Menean, "3D Modeling of the St. Anthony Abbot Church in S. Daniele del Friuli (I): From Laser Scanning and Photogrammetry to Vrml/X3D Model", Proceedings of the 3rd ISPRS International Workshop, 3D-ARCH 2009: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures". Volume XXXVIII-5/W1, 2009.
- P. Callet, S. Dumazet, C. Leclercq and C. Politi, "Natural Lighting, Gilt and Polychromy of Notre-Dame de Paris Cathedral", Proceedings of the 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST 2010, pp 63-70.
- H.-J. Przybilla and J. Peipe, "3D Modeling of Heritage Objects by Fringe Projection and Laser

- Scanning Systems”, Proceedings of the XXI International CIPA Symposium, 2007.
- P. Semião and M. B. Carmo, “Virtual Art Gallery Tool”, Proceedings GRAPP 2008, pp 471-476.
- AutoCAD:
<http://www.autodesk.com/products/autodesk-autocad/overview>
- 3DS Max:
<http://www.autodesk.com/products/autodesk-3ds-max/overview>
- J. T. Kider, R. L. Fletcher, R. Yu, A. Chalmers and N. Badler, “Recreating Early Islamic Glass Lamp Lighting”, Proceedings of the 10th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST 2009, pp 33-40.
- J. Happa, A. Artusi, T. Bashford-Rogers, K. Debattista, V., Hulusic and A. Chalmers, “The Virtual Reconstruction and Daylight Illumination of the Panagia Angeloktisti”, Proceedings of the 10th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST 2009, pp 49-56.
- V. Sundstedt, A. Chalmers and P. Martinez, “High Fidelity Reconstruction of the Ancient Egyptian Temple of Kalabsha”, Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa, AFRIGRAPH 2001, 2004, pp 43-47.
- Maya: <http://www.autodesk.com/products/autodesk-maya/>
- Photomodeler: <http://www.photomodeler.com/>
- Leica C10: <http://www.leica-geosystems.com/de/79411.htm>
- Trimble: <http://www.trimble.com/>
- VisualSFM:
<http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm/>
- Blender: <http://www.blender.org/>
- X3D: <http://www.web3d.org/x3d/learn/>
- Blender 3D Design Course:
<http://gryllus.net/Blender/3D.html>
- Blender Guru Tutorials:
<http://www.blenderguru.com/>
- [1] Web3D- <http://www.web3d.org/products/C21/>
- [2] Octaga Player:
<http://octagavs.com/software/octaga-player>
- [3] Web site of the produced materials:
<http://VirtualTeachingAstronomicalObservatoryofLisbon.fc.ul.pt>